



VNIVERSITAT  
DE VALÈNCIA

DOCTORADO EN FÍSICA

Departamento de Física Atómica, Molecular y Nuclear

Instituto de Física Corpuscular (CSIC-UV)

## **Electrónica de Adquisición de KM3NeT e Instrumentación de Calibración Temporal para Telescopios de Neutrinos Submarinos**

Diego Real Máñez

*Directores* Dr. Juan Zúñiga Román y Dr. Juan de Dios  
Zornoza Gómez

Abril, 2020

**Diego Real Máñez**

*Electrónica de Adquisición de KM3NeT e Instrumentación de Calibración Temporal  
para Telescopios de Neutrinos Submarinos*

Abril, 2020

Directores: Dr. Juan Zúñiga Román y Dr. Juan de Dios Zornoza Gómez

**Universidad de Valencia**

*Grupo de Física de Astropartículas*

Instituto de Física Corpuscular (CSIC-UV)

Departamento de Física Atómica, Molecular y Nuclear

C/ Catedrático José Beltrán, 2

46980 , Paterna



# Declaración

Dr. JUAN ZÚÑIGA ROMÁN, catedrático de la Universidad de Valencia en el Departamento de Física Atómica, Molecular y Nuclear de la Facultad de Física, y Dr. JUAN DE DIOS ZORNOZA GÓMEZ, contratado doctor en el Departamento de Física Atómica, Molecular y Nuclear de la Facultad de Física,

CERTIFICAN,

Que la presente memoria, *Electrónica de Adquisición de KM3NeT e Instrumentación de Calibración Temporal para Telescopios de Neutrinos Submarinos*, ha sido realizada bajo su dirección en el Instituto de Física Corpuscular (centro mixto Universidad de Valencia - CSIC) por D. Diego Real Máñez y constituye su Tesis Doctoral en el Departamento de Física Atómica, Molecular y Nuclear de la Universidad de Valencia para optar al grado de Doctor en Física.

Y para que conste, en cumplimiento de la legislación vigente, firmamos el presente certificado en Paterna, a 6 de abril de 2020.

*Paterna, Abril, 2020*

---

**Dr. Juan Zúñiga Román**

---

**Dr. Juan de Dios Zornoza Gómez**



*A mis padres*



# Agradecimientos

” *El trabajo dignifica*

— Miguel Máñez García

A mi familia, especialmente a mi abuelo Miguel que tanto me enseñó con el ejemplo. A mis compañeros de grupo, tanto los que todavía continúan como los que ya no, de KM3NeT y ANTARES, así como al resto de compañeros del IFIC, en particular a los *ranners* del IFIC, sobretodo por las comilonas y tertulias en *Les Maries*. También darle las gracias a mis colegas y compañeros de las colaboraciones ANTARES y KM3NeT, con muchos de los cuales me une una gran amistad. No quisiera olvidarme tampoco de mis compañeros de la UGR y de la UPV.

Especial agradecimiento a mis directores por su confianza y sus ánimos para finalizar esta tesis doctoral así como a Juanjo por brindarme la oportunidad de unirme al fascinante mundo de la investigación.

A todos ellos les pertenece un pedacito, en mayor o menor medida, de este trabajo.

Agradecerle también a las empresas que han colaborado de una u otra manera en los trabajos de investigación documentados en esta tesis: A MaserMic, por su colaboración durante la fabricación primero de los prototipos de la electrónica de *readout* de KM3NeT y posteriormente durante la fabricación en serie. A Hiperbaric, del grupo Nicolás Correa, por ofrecer sus instalaciones para los tests de presión del contenedor del *laser beacon* de ANTARES. A Xilinx, por estar siempre disponible para solucionar los diferentes problemas que han ido surgiendo durante la implementación del *firmware* de *readout* de KM3NeT y por suministrarnos varias tarjetas

de evaluación de *Kintex* a través de su programa universitario. A Seven Solutions, por su ayuda a implementar el protocolo *White Rabbit* en la especial topología de KM3NeT.

Y por último agradecer a los proyectos que han financiado esta investigación:

Plan Estatal de Investigación (refs. FPA2015–65150–C3–1–P, –2–P and –3–P, MINECO/FEDER).

Programa Severo Ochoa Centro de Excelencia (MINECO).

Red Consolider MultiDark (ref. FPA2017–90566–REDC, MINECO).

Y a los programas Prometeo y Grisolí (Generalitat Valenciana).

” *I don’t say that the neutrino is going to be a practical thing, but it has been a time-honored pattern that science leads, and then technology comes along, and then, put together, these things make an enormous difference in how we live.*

— **Frederick Reines**





# Prólogo

Los telescopios de neutrinos son un tipo de telescopios relativamente recientes cuyo origen se remonta a la propuesta de Markov en los años 60 de instalar detectores en las profundidades de un lago o en el mar y determinar la dirección de las partículas cargadas con la ayuda de la radiación Cherenkov. Este tipo de detectores empieza a dar ahora sus primeros frutos en la observación del Universo, frutos tales como la reciente observación de los neutrinos extragalácticos provenientes del *blazar* TXS 0506+056, que impulsarán definitivamente este tipo de infraestructura. No menos importante que la observación del Universo (Astronomía) es la Física de Partículas, donde los telescopios de neutrinos pueden aportar información importante acerca de la naturaleza del neutrino, como por ejemplo sobre la oscilación entre los diferentes sabores de neutrinos, el ordenamiento de su masa, así como otras preguntas que ni siquiera están todavía formuladas.

Los telescopios de neutrinos, contruidos o en construcción, se basan en la detección de la luz de Cherenkov producida por las partículas relativistas originadas durante la interacción de los neutrinos con la materia. La matriz de fotomultiplicadores que usualmente constituye el telescopio de neutrinos debe adquirir con la suficiente resolución y sincronización las señales ópticas provenientes de la luz de Cherenkov para poder reconstruir correctamente las trayectorias de los neutrinos que interaccionan en las inmediaciones del telescopio. Los instrumentos y técnicas necesarios para alcanzar este fin son el objeto principal de esta tesis doctoral en la que se presentan dos de los principales instrumentos de calibración temporal utilizadas en ANTARES y KM3NeT, así como la electrónica de adquisición de KM3NeT.

Esta tesis está dividida en tres grandes bloques.

El primer bloque introductorio está dividido en cuatro capítulos diferentes. En el Capítulo 1 se describen los objetivos físicos que justifican los telescopios de neutrinos así como el principio de funcionamiento. En el Capítulo 2 se presenta un resumen de los principales telescopios de neutrinos, desde el primero en postularse -aunque finalmente no se construiría-, DUMAND, hasta IceCube, que recientemente ha detectado los primeros neutrinos extragalácticos. En los Capítulo 3 y 4 se describen los dos telescopios de neutrinos en los que se han desarrollado los trabajos de investigación presentados en la presente tesis, ANTARES -Capítulo 3- y KM3NeT -Capítulo 4-.

El segundo bloque de publicaciones se divide en dos Capítulos diferentes. En el Capítulo 5 se presentan las publicaciones relacionadas con la instrumentación de calibración temporal de los telescopios ANTARES y KM3NeT. En el Capítulo 6 se incluyen las publicaciones relacionadas con la electrónica de adquisición de KM3NeT.

Finalmente se presenta en el último bloque un resumen de la tesis y las conclusiones, así como la visión del autor sobre futuras tareas a realizar en este ámbito.

# Índice

<b>I</b>	<b>Introducción</b>	<b>1</b>
<b>1</b>	<b>Física de los telescopios de neutrinos</b>	<b>3</b>
1.1	Introducción . . . . .	3
1.2	Astronomía de neutrinos . . . . .	5
1.2.1	Rayos cósmicos . . . . .	6
1.2.2	Astronomía de neutrinos de alta energía . . . . .	9
1.2.3	Posibles fuentes de neutrinos cósmicos de alta energía . . . . .	13
1.2.3.1	Fuentes Galácticas . . . . .	13
1.2.3.2	Fuentes extra-galácticas . . . . .	15
1.3	Física de partículas con telescopios de neutrinos . . . . .	16
1.3.1	Búsqueda indirecta de materia oscura . . . . .	17
1.3.2	Oscilaciones de neutrinos . . . . .	18
1.3.3	Búsqueda de Monopolos Magnéticos . . . . .	18
1.3.4	Violación de la invariancia Lorentz . . . . .	19
1.4	Principio de detección en los telescopios de neutrinos . . . .	19
1.4.1	Introducción . . . . .	19
1.4.2	Interacciones de neutrinos . . . . .	20
1.4.3	Radiación Cherenkov . . . . .	22
1.4.4	Fondo Físico . . . . .	23
<b>2</b>	<b>Telescopios de neutrinos</b>	<b>27</b>
2.1	Introducción . . . . .	28
2.2	El inicio de la historia de los telescopios de neu- trinos: DUMAND . . . . .	28
2.2.1	Electrónica de adquisición de DUMAND . . . . .	30
2.3	Baikal - NT200 - GVD . . . . .	34

2.3.1	Los orígenes . . . . .	34
2.3.2	Neutrino Telescope 200 . . . . .	34
2.3.3	GVD . . . . .	35
2.3.4	El emplazamiento de GVD . . . . .	35
2.4	JULIA: detección de neutrinos en las Canarias . . . . .	37
2.4.1	Electrónica de adquisición del OM . . . . .	37
2.4.2	Características del <i>DMQT</i> del EOM - DUMAND II . . . . .	38
2.5	NESTOR . . . . .	42
2.5.1	La propuesta . . . . .	42
2.5.2	Electrónica de adquisición de NESTOR . . . . .	45
2.5.2.1	Tarjeta de adquisición de piso . . . . .	45
2.5.2.2	Tarjeta de <i>slow control</i> y otros elementos . . . . .	46
2.6	NEMO . . . . .	48
2.6.1	Electrónica de adquisición de NEMO . . . . .	49
2.7	AMANDA . . . . .	51
2.7.1	Electrónica de adquisición de AMANDA . . . . .	52
2.7.2	Instrumentación de calibración en AMANDA . . . . .	53
2.8	IceCube . . . . .	55
2.8.1	Introducción . . . . .	55
2.8.2	DOM . . . . .	56
2.8.3	Electrónica de adquisición de IceCube . . . . .	56
2.8.4	Fiabilidad . . . . .	59
<b>3</b>	<b>ANTARES</b>	<b>61</b>
3.1	Introducción . . . . .	61
3.2	Líneas . . . . .	62
3.2.1	Módulo óptico . . . . .	63
3.2.2	Pisos . . . . .	64
3.2.3	Módulo de control local . . . . .	65
3.2.4	Sectores . . . . .	65
3.3	Adquisición de datos . . . . .	66
3.4	La electrónica de <i>frontend</i> . . . . .	67
3.4.1	El ASIC ARS . . . . .	68
3.4.2	Descripción funcional del ARS . . . . .	69
<b>4</b>	<b>KM3NeT</b>	<b>75</b>

4.1	Introducción . . . . .	75
4.2	Ubicación de KM3NeT . . . . .	77
4.2.1	KM3NeT en Italia: ARCA . . . . .	77
4.2.2	KM3NeT en Francia: ORCA . . . . .	77
4.3	La DU de KM3NeT . . . . .	79
4.4	El DOM de KM3NeT . . . . .	80
<b>II</b>	<b>Publicaciones</b>	<b>85</b>
<b>5</b>	<b>Instrumentación de Calibración Temporal para Telescopios de Neutrinos Submarinos</b>	<b>87</b>
5.1	The ANTARES Optical Beacon System . . . . .	88
5.2	Development of a new Laser Beacon for Time calibration in the ANTARES Neutrino Telescope . . . . .	101
5.3	The Time Calibration System of KM3NeT: The Laser Beacon and the Nanobeacon . . . . .	108
<b>6</b>	<b>Electrónica de Adquisición de KM3NeT</b>	<b>117</b>
6.1	The data acquisition system of the KM3NeT detector . . . . .	118
6.2	Status of the central logic board (CLB) of the KM3NeT neutrino telescope . . . . .	128
6.3	Reliability Studies for KM3NeT electronics: The FIDES method . . . . .	137
6.4	Digital Optical Module Electronics of KM3NeT . . . . .	144
6.5	The KM3NeT Digital Optical Module electronics: hardware, firmware and software . . . . .	153
<b>III</b>	<b>Conclusiones</b>	<b>171</b>
<b>7</b>	<b>Resumen</b>	<b>173</b>
7.1	Objetivos de la tesis . . . . .	173
7.2	Instrumentación de calibración temporal para telescopios de neutrinos . . . . .	174
7.2.1	ANTARES . . . . .	174
7.2.2	Mejoras del <i>laser beacon</i> de ANTARES . . . . .	176

7.2.3	KM3NeT . . . . .	177
7.3	Electrónica de adquisición de KM3NeT . . . . .	179
7.3.1	Power Board . . . . .	179
7.3.2	Signal Collection Board . . . . .	180
7.3.3	Central Logic Board . . . . .	181
7.3.3.1	CLB Hardware . . . . .	182
7.3.3.2	Firmware . . . . .	182
7.3.3.3	Procesador empotrado . . . . .	183
7.3.3.4	State machine . . . . .	183
7.3.3.5	TDCs . . . . .	183
7.3.3.6	Adquisición de los datos del sensor piezo acústico. . . . .	184
7.3.3.7	IPMux . . . . .	184
7.3.3.8	El core de Multiboot . . . . .	185
7.3.3.9	Software empotrado de la CLB . . . . .	185
7.3.4	La base del PMT . . . . .	185
7.3.4.1	ASICs de la base del PMT . . . . .	186
7.3.5	Fiabilidad . . . . .	186
<b>8</b>	<b>Aportaciones realizadas</b>	<b>189</b>
<b>9</b>	<b>Líneas de investigación futuras</b>	<b>191</b>
	<b>Referencias</b>	<b>193</b>
	<b>Acrónimos</b>	<b>201</b>

# Bloque I

---

Introducción





# Física de los telescopios de neutrinos

“ *If I could remember the names of all these particles, I'd be a botanist.* ”

— Enrico Fermi

## 1.1 Introducción

La historia “formal” de la escurridiza partícula cuya detección es objeto de esta tesis y que responde al nombre de neutrino arranca el 4 de diciembre de 1930. En esa fecha Pauli escribe una carta a los participantes de la conferencia de Tübingen (ver Figura 1.1) en la que postula la existencia de una nueva partícula neutra en el núcleo, de spin  $\frac{1}{2}$  y masa similar al electrón. Esta nueva partícula resolvería el problema de la desintegración beta en el nitrógeno 14. No sería hasta 1933 cuando Pauli formularía la hipótesis formalmente [1].

El nombre de neutrino, que significa neutrón pequeño en italiano, se lo daría posteriormente, en 1933, Fermi, al desarrollar una teoría sobre la desintegración beta [2]. Según esta teoría, cuando un neutrón pasa a convertirse en un protón emitirá tanto un electrón como un neutrino. El neutrino emitido será de una masa muy pequeña, por lo que, sumado al hecho que su carga es neutra, su probabilidad de interacción con la materia es muy pequeña.

Esta baja probabilidad de interacción hace del neutrino un transmisor de información único. Esto se debe a que el neutrino puede traspasar materia interestelar, escapar de las regiones más densas del Universo y viajar sin desviarse bajo el efecto de campos electromagnéticos intergalácticos. Pero a su vez, estas características, hacen muy difícil su detección.

original - Photocopy of PL 0393  
Abschrift/15.12.56 PW

Offener Brief an die Gruppe der Radioaktiven bei der  
Gauvereins-Tagung zu Tübingen.

Abschrift

Physikalisches Institut  
der Eidg. Technischen Hochschule  
Zürich

Zürich, 4. Dez. 1930  
Gloriastrasse

Liebe Radioaktive Damen und Herren,

Wie der Ueberbringer dieser Zeilen, den ich huldvollst  
ansuhören bitte, Ihnen das näheren auseinandersetzen wird, bin ich  
angesichts der "falschen" Statistik der  $\beta$ - und  $\text{Li-6}$  Kerne, sowie  
des kontinuierlichen  $\beta$ -Spektrums auf einen verzweifelten Ausweg  
verfallen um den "Wechselsatz" (1) der Statistik und den Energiesatz  
zu retten. Nämlich die Möglichkeit, es könnten elektrisch neutrale  
Teilchen, die ich Neutronen nennen will, in den Kernen existieren,  
welche den Spin  $1/2$  haben und das Ausschliessungsprinzip befolgen und  
sich von Lichtquanten ausserdem noch dadurch unterscheiden, dass sie  
nicht mit Lichtgeschwindigkeit laufen. Die Masse der Neutronen  
müsste von derselben Grössenordnung wie die Elektronenmasse sein und  
jedemfalls nicht grösser als  $0,01$  Protonenmasse. Das kontinuierliche  
 $\beta$ -Spektrum wäre dann verständlich unter der Annahme, dass beim  
 $\beta$ -Zerfall mit dem Elektron jeweils noch ein Neutron emittiert  
würde, derart, dass die Summe der Energien von Neutron und Elektron  
konstant ist.

Nun handelt es sich weiter darum, welche Kräfte auf die  
Neutronen wirken. Das wahrscheinlichste Modell für das Neutron scheint  
mir aus wellenmechanischen Gründen (näheres weiss der Ueberbringer  
dieser Zeilen) dieses zu sein, dass das ruhende Neutron ein  
magnetischer Dipol von einem gewissen Moment  $\mu$  ist. Die Experimente  
verlangen wohl, dass die ionisierende Wirkung eines solchen Neutrons  
nicht grösser sein kann, als die eines  $\gamma$ -Strahls und darf dann  
 $\mu$  wohl nicht grösser sein als  $e \cdot (10^{-13} \text{ cm})$ .

Ich traue mich vorläufig aber nicht, etwas über diese Idee  
zu publizieren und wende mich erst vertrauensvoll an Euch, liebe  
Radioaktive, mit der Frage, wie es um den experimentellen Nachweis  
eines solchen Neutrons stünde, wenn dieses ein ebensolches oder etwa  
10mal grösseres Durchdringungsvermögen besitzen würde, wie ein  
 $\gamma$ -Strahl.

Ich gebe zu, dass mein Ausweg vielleicht von vornherein  
wenig wahrscheinlich erscheinen wird, weil man die Neutronen, wenn  
sie existieren, wohl schon längst gesehen hätte. Aber nur wer wagt,  
ganz und der Ernst der Situation beim kontinuierlichen  $\beta$ -Spektrum  
wird durch einen Ausspruch meines verehrten Vorgängers im Amt,  
Herrn Debye, beleuchtet, der mir kürzlich in Brüssel gesagt hat:  
"O, daran soll man am besten gar nicht denken, sowie an die neuen  
Steuern." Darum soll man jeden Weg zur Rettung ernstlich diskutieren.  
Also, liebe Radioaktive, prüfet, und richtet. Leider kann ich nicht  
persönlich in Tübingen erscheinen, da ich infolge eines in der Nacht  
vom 6. zum 7. Dez. in Zürich stattfindenden Balles hier unabkömmlich  
bin. Mit vielen Grüssen an Euch, sowie an Herrn Baeß, Euer  
untertänigster Diener

gez. W. Pauli

Fig. 1.1: Carta de Pauli a los "radioactivos miembros" de la conferencia de Tübingen en la que se postula por primera vez la existencia del neutrino.

El mérito de la detección de los primeros neutrinos recae sobre Reines y Cowan, quienes en 1953, en su experimento de Savannah River, lograron por primera vez su observación, siendo el flujo original de neutrinos generado por la central nuclear del mismo nombre [3].

Posteriormente han sido detectados tanto neutrinos generados en el Sol como neutrinos proveniente de la SN (SuperNova) de 1987 (SN1987a), abriendo paso a una nueva disciplina, la astronomía de neutrinos, que responde a la necesidad de extender la astronomía convencional más allá de los mensajeros convencionales. De hecho, en julio de 2018 se detectaron los primeros neutrinos provenientes de una fuente extra-galáctica, el *blazar* TXS 0506+056 [4, 5].

Como los neutrinos pueden escapar de entornos astrofísicos mucho más densos que los que puede atravesar la luz, pueden proporcionar información de procesos que se muestran ocultos para la astronomía convencional. A su vez, su extremadamente baja sección eficaz hace de su detección un reto.

## 1.2 Astronomía de neutrinos

La astronomía de neutrinos se inició con la detección de los neutrinos solares [6] y de la supernova SN 1987A, neutrinos ambos en el espectro de baja energía.

En el rango de  $\mu\text{eV}$  y  $\text{meV}$  se espera la existencia de neutrinos cosmológicos, que serían el equivalente al CMB (Fondo Cósmico de Microondas - *Cosmic Microwave Background*) de 2.7 K. Dado lo extremadamente baja que es la sección eficaz de los neutrinos a esas energías, no existen actualmente experimentos de viabilidad confirmada para detectarlos.

En el rango de energías de  $\text{keV-MeV}$  se encuentran los neutrinos generados por el Sol, por las supernovas, por los reactores nucleares y por las reacciones nucleares del interior de la Tierra. Los siguientes neutrinos en ser detectados fueron los neutrinos solares, iniciándose, como se ha dicho, la historia de la astronomía del neutrino, y originándose interesantes preguntas acerca de la naturaleza del neutrino y su flujo.

El flujo observado resultó ser menor del esperado y para resolver este problema se postuló la existencia de las oscilaciones en los neutrinos: los neutrinos electrónicos generados en el Sol se irían convirtiendo (u oscilando) a neutrinos muónicos o tauónicos. La existencia de estas oscilaciones fue confirmada finalmente por la colaboración SNO (Observatorio de Neutrinos de Sudbury - *Sudbury Neutrino Observatory*) en 2001 [7, 8].

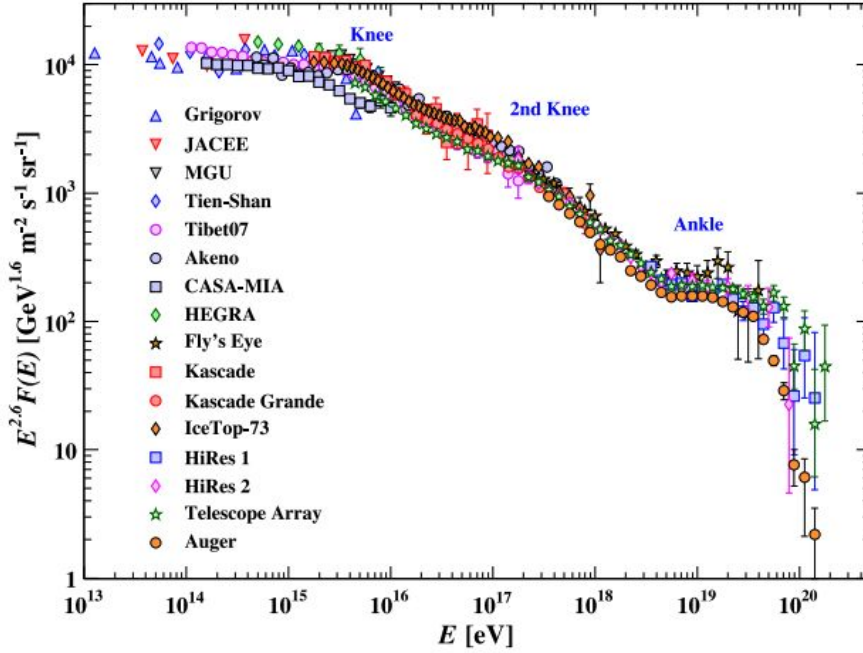
El 23 de febrero de 1987 se detectaron los primeros neutrinos galácticos provenientes de la SN 1987A de la gran nube de Magallanes -un satélite de la vía láctea-. Se detectaron neutrinos asociados a la SN tanto en el experimento Kamiokande II [9, 10] como en IMB (Detector Irvine – Michigan – Brookhaven) [11, 12], ambos detectores de luz Cherenkov en agua. Igualmente se detectaron en el centelleador de Baksan [13, 14]. Las SNs se cree que se producen con una frecuencia de alrededor de unas tres por siglo, con lo cual, con la construcción de grandes observatorios de neutrinos, como IceCube o KM3NeT, la detección de neutrinos de SNs tiene una probabilidad considerable.

Los neutrinos procedentes de las reacciones nucleares en el interior de la Tierra se detectaron en 2010 [15], mientras que los neutrinos atmosféricos fueron detectados por primera vez en 1965 [16]. Estos, como se verá más adelante, se generan por las interacciones de los rayos cósmicos con la atmósfera.

Los neutrinos de mayores energías son los provenientes de fuentes como SNR (Remanentes de SuperNova- *SuperNova Remnants*) o AGNs (Núcleos de Galaxias Activas - *Active Galactic Nuclei*) o los provenientes de la interacción de protones ultra energéticos con el fondo cósmico de microondas. Este tipo de neutrinos es el que se espera poder detectar principalmente en los telescopios de neutrinos que se han instalado o se instalarán próximamente, si bien las predicciones de su flujo son bastante inciertas.

### 1.2.1 Rayos cósmicos

Una de las principales preguntas en la física de astropartículas es determinar el origen de los CRs (Rayos cósmicos - *Cosmic Rays*) de alta energía, que fueron detectados por primera vez en 1912 por Víctor Hess [17]. Si bien se ha podido medir la energía de los rayos cósmicos que golpean la atmósfera



**Fig. 1.2:** Espectro de energía de los rayos cósmicos. Figura obtenida de [18].

terrestre, su origen todavía sigue siendo incierto. Existen indicaciones de que la mayor parte de los rayos cósmicos tiene un origen galáctico, aunque debido a su naturaleza no es posible determinar, a partir de la dirección detectada en la Tierra, la fuente, ya que los rayos cósmicos se ven afectados por los campos magnéticos que alteran su trayectoria original.

La radiación cósmica está compuesta principalmente de protones (79%) y núcleos de helio (15%), mientras que el resto son núcleos más pesados y electrones. Los rayos cósmicos se pueden detectar directamente mediante experimentos a bordo de satélites y globos e indirectamente observando las extensas cascadas que producen en la atmósfera terrestre. La Figura 1.2 muestra el espectro de energía de todas las partículas de los CRs. El espectro abarca varios órdenes de magnitud en flujo y energía, hasta más de  $10^{20}$  eV, y sigue una ley de potencias de la forma:

$$\frac{dN}{dE} \propto E^{-\alpha}$$

dónde  $\alpha$  es el denominado índice espectral. Se observan tres cambios importantes en el espectro respecto al índice espectral: llamados rodilla, segunda rodilla y tobillo. En la rodilla ( $E \sim 3 \times 10^{15}$  eV), el índice espectral cambia de 2.7 a 3.1. Una segunda inclinación más pronunciada se observa en la segunda rodilla ( $E \sim 4 \times 10^{17}$  eV) con un valor de  $\alpha$  de 3.3, mientras que en la energía del tobillo ( $E \sim 10^{19}$  eV) el espectro de energía se aplanan de nuevo a un valor de 2.7. Se cree que los CRs hasta la rodilla son de origen galáctico, siendo los SNR los principales candidatos. El valor del índice espectral en esta zona del espectro puede explicarse como resultado del efecto combinado del mecanismo de aceleración en la fuente y de su propagación en la Galaxia. El mecanismo responsable más ampliamente aceptado para la aceleración de partículas cargadas es el mecanismo de aceleración de Fermi de primer orden [19]. En este escenario, la aceleración de partículas se explica mediante procesos de dispersión de las partículas cargadas en los frentes de choque de fenómenos astrofísicos. Las partículas confinadas en las in-homogeneidades del campo magnético, ganan energía cada vez que atraviesan el frente de choque.

El origen de la inclinación del espectro de CR en la rodilla y en la segunda rodilla sigue siendo una cuestión sin resolver y abierta a diferentes modelos que se han propuesto para explicar estas características. Las explicaciones más populares se basan en el máximo de energía que se puede alcanzar durante el proceso de aceleración en las diferentes fuentes galácticas y en su posterior fuga de la Galaxia. El aplanamiento del espectro en la región del tobillo generalmente se asocia con la transición de un origen galáctico a uno extra-galáctico de los CRs [20, 21]. De hecho, el radio de Larmor de un protón con energía por encima del tobillo, sometido al campo magnético Galáctico excede el grosor del disco de la Galaxia (300 pc), lo que implica que los CRs por encima del tobillo no pueden limitarse a un origen dentro de la galaxia. Mientras que el argumento de Larmor restringe el origen de los CRs por encima del tobillo extra-galáctico, existe un límite superior teórico sobre la distancia máxima de las fuentes debido a la supresión GZK (Greisen - Zatsepin - Kuzmin) [22, 23]. Por encima de una determinada energía, los protones comienzan a interactuar con los fotones de CMB produciendo piones a través de la resonancia  $\Delta^+$  :

$$p + \gamma CMB = \begin{cases} \pi^0 + p \\ \pi^+ + n \end{cases}$$

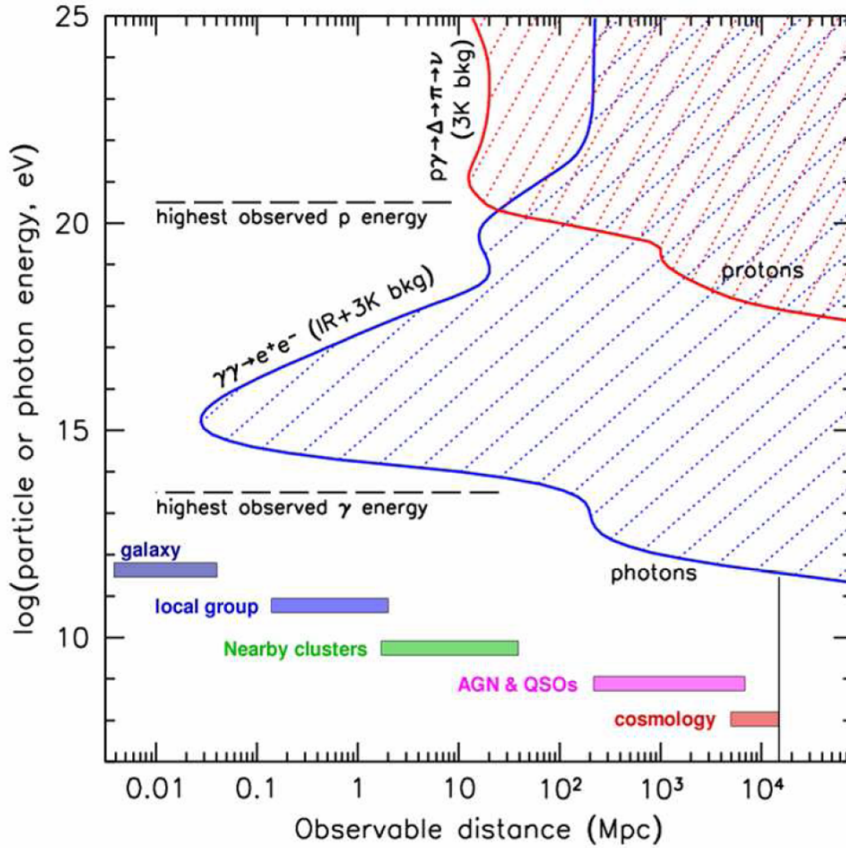
Los efectos de la supresión GZK comienzan a ser importantes para energías de los protones por encima de  $5 \times 10^{19}$  eV, pues no pueden viajar distancias más allá de unas pocas decenas de Mpc. Este efecto suprime el flujo observado de rayos cósmicos por encima de dicha energía debido a la ausencia de fuentes capaces de acelerar por encima del corte GZK en el super cluster local al que pertenece nuestra galaxia.

### 1.2.2 Astronomía de neutrinos de alta energía

El uso de neutrinos de alta energía como mensajeros cósmicos puede presentar importantes ventajas en comparación con los fotones o protones de muy alta energía. Debido a la interacción con la luz infrarroja ambiental y con el CMB, la máxima distancia del Universo que se puede ver con fotones de energías por encima de  $10^{12}$  eV varía entre 200 y 0.03 Mpc (ver Figura 1.3). Esto se traduce en una limitación de 100-1000 Mpc (galaxias distantes) a  $10^{12}$  eV o el grupo local a  $10^{15}$  eV. Los protones de muy altas energías ( $10^{20}$ ) solo pueden ser desviados unos pocos grados de su fuente original después de la interacción con campos magnéticos galácticos. Sin embargo, los flujos a esas energías tan altas son extremadamente bajos. Ninguno de estos problemas surge para los neutrinos de alta energía.

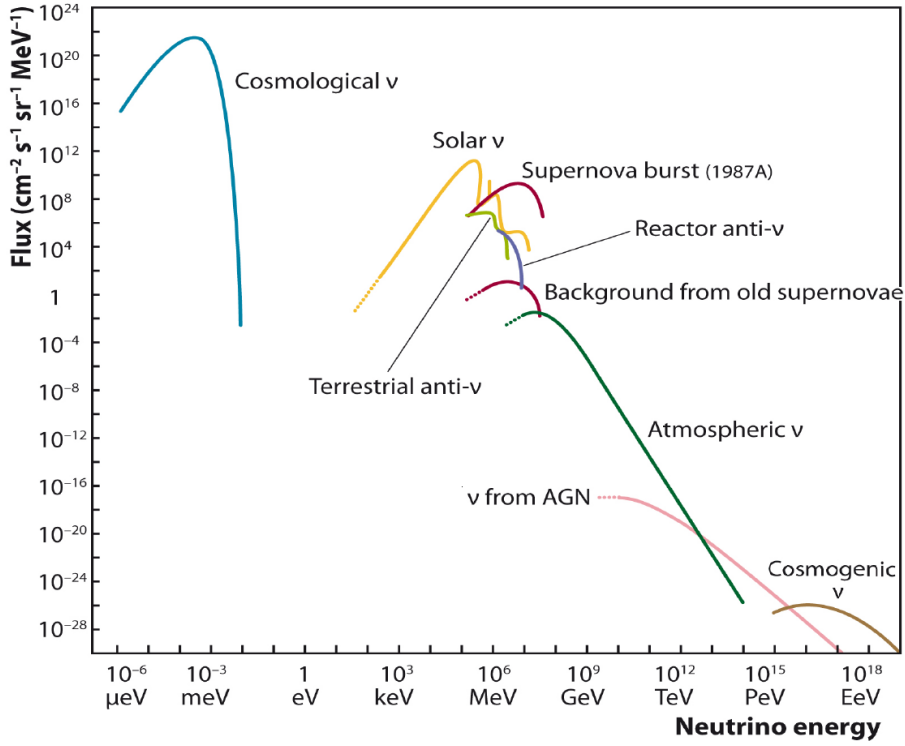
Como los neutrinos solo interactúan débilmente, el Universo es efectivamente transparente a ellos. La Figura 1.4 resume los flujos de neutrinos observados y estimados en función de la energía para diferentes fuentes. Los mecanismos de producción y las fuentes propuestas en las secciones siguientes se encuentran en el rango de entre 100 GeV y 10 PeV.

Cualquier objeto astrofísico capaz de proporcionar frentes de choque y confinar partículas mediante campos magnéticos tiene el potencial de acelerar partículas cargadas por medio del mecanismo de Fermi. Suponiendo que una fracción de los CRs interactúa con la materia y con los fotones del propio emplazamiento, es de esperar que se produzcan también rayos gamma y neutrinos de alta energía. Este escenario se conoce como modelo



**Fig. 1.3:** La energía de los mensajeros cósmicos con respecto a la distancia máxima a la que son detectables. Los fotones están afectados por la absorción del fondo infrarrojo y del fondo de microondas cósmico: el área sombreada en azul representa, para una energía dada, el rango de distancias que un fotón no puede alcanzar. Los protones, además de la deflexión debida a los campos magnéticos, también son absorbidos por el fondo de microondas: el área sombreada en rojo indica la distancia que un protón no puede alcanzar. Figura obtenida de [24].





**Fig. 1.4:** Flujo de neutrinos esperado y observado en función de la energía. La astronomía de neutrinos de alta energía cubre el rango entre  $10^2$  GeV y 10 PeV. Figura obtenida de [25].

hadrónico, y la producción de rayos gamma y neutrinos se explica a partir de la desintegración de los piones producidos en las interacciones de los protones acelerados con los fotones vía la desintegración de la resonancia Delta:

$$p + \gamma \rightarrow \Delta^+ \rightarrow \begin{cases} \pi^0 + p \\ \pi^\pm + n \end{cases}$$

O con la materia:

$$p + p \rightarrow \begin{cases} p + p + \pi^- \\ p + n + \pi^0 \end{cases}$$

y:

$$p + n \rightarrow \begin{cases} p + p + \pi^0 \\ p + n + \pi^+ \end{cases}$$

Mientras que los rayos gamma se producirían por la desintegración de piones neutros ( $\pi^0$ ) en dos rayos gamma:

$$\pi^0 \rightarrow \gamma + \gamma$$

Los neutrinos se producirían por la desintegración de los piones cargados ( $\pi^+$  y  $\pi^-$ ):

$$\begin{aligned} \pi^+ &\rightarrow \nu_\mu + \mu^+ \\ &\hookrightarrow \mu^+ \rightarrow \bar{\nu}_\mu + \nu_e + e^+ \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} \pi^- &\rightarrow \bar{\nu}_\mu + \mu^- \\ &\hookrightarrow \mu^- \rightarrow \nu_\mu + \bar{\nu}_e + e^- \end{aligned}$$

Este modelo, como se ve, conecta los mecanismos que llevan a la producción de neutrinos y rayos gamma de alta energía con la interacción de los rayos cósmicos con la materia. Así, el espectro de energía de las partículas secundarias seguiría la misma ley de potencias que los rayos cósmicos que las originan y sería posible poner límites al flujo de neutrinos de fuentes de rayos gamma detectados en la Tierra.

Sin embargo, el modelo hadrónico no es el único capaz de explicar la producción de rayos gamma. Los modelos leptónicos sugieren que la fuente de rayos gamma se debe a la interacción de electrones / positrones con campos electromagnéticos [26, 27]. Así, la producción de radiación sincrotrón producida debido al movimiento de electrones alrededor de un campo magnético, podría dar lugar a una emisión de rayos gamma a través de la dispersión IC (Compton Inversa - *Inverse Compton*) de dichos fotones sincrotrón con los propios electrones que los han producido según el modelo SSC (Auto Dispersión Compton - *Self Scattering Compton*).

Los modelos leptónicos pueden explicar la aceleración de los rayos gamma hasta energías de 100 TeV, pero no más altas. La mayoría de las fuentes de TeV observadas son compatibles con los modelos leptónicos. Sin embargo, este modelo resulta desfavorecido para explicar el espectro de algunas fuentes. Así, la colaboración Fermi, informó en 2013 que los espectros de los SNRs IC443 y W44 se explican mejor a través de procesos hadrónicos, ya que los procesos leptónicos no podrían explicar las mediciones de energías de fotones por debajo de 1 GeV [28].

A día de hoy no existe una confirmación clara sobre la existencia de nuevas fuentes con procesos hadrónicos. Una detección clara de una fuente de neutrinos de alta energía sería inequívocamente, la indicación de la presencia de este tipo de procesos. Varias fuentes se han propuesto como tales, pero la ausencia de una señal correlacionada con un objeto astrofísico solo ha dado como resultado la estimación de límites superiores para algunos de ellos.

La predicción de las fuentes de neutrinos de alta energía de origen extragaláctico es una consecuencia directa de la observación de rayos cósmicos muy energéticos. Como se ha mencionado anteriormente, esta conexión entre Rayos cósmicos - *Cosmic Rays* (CR)s y neutrinos puede ser utilizada para fijar los límites superiores del flujo de neutrinos proveniente de fuentes extra-galácticas, ya que, el flujo de neutrinos nunca excederá el flujo de protones de alta energía. Estas predicciones exigen que la escala del tamaño de los telescopios de neutrinos deba de ser del orden del kilómetro cúbico.

### 1.2.3 Posibles fuentes de neutrinos cósmicos de alta energía

#### 1.2.3.1 Fuentes Galácticas

**Remanentes de supernova de tipo shell.** Los SNRs son los restos tras una explosión de SN. En particular, este tipo de SNRs presenta una morfología característica con una capa exterior expansiva que domina la emisión de luz [29]. La capa externa se forma cuando la onda de choque de la explosión de SN se expande por el medio interestelar y calienta el material a su paso. El material emitido se mueve en frentes de choque a velocidades del orden de  $10^5$  m/s, en un proceso que puede continuar hasta  $10^4 - 10^5$  años antes

de que la energía liberada sea insignificante. Este tipo de SNR es una de las fuentes candidatas preferidas de aceleración hadrónica, ya que explicarían la aceleración de los rayos cósmicos hasta la rodilla (ver Sección 1.2.1). Además de los dos SNR ya mencionados (IC443 y W44), se ha propuesto el SNR RX J1713.7–3946 por varios autores como candidato a fuente de neutrinos [30, 31, 32], ya que es el SNR de tipo *shell* más brillante en rayos gamma con energías del TeV.

**El Centro Galáctico.** El Centro Galáctico es una región de mucho interés para la astronomía de neutrinos de alta energía debido a la existencia de un agujero negro supermasivo en la ubicación de SgrA \* [33] y la alta densidad de objetos astrofísicos (SNRs de tipo *shell* y púlsar, rayos X, binarios, etc.). Además, es la única fuente conocida capaz de producir partículas de PeV (y, por lo tanto, de protones de PeV) en nuestra galaxia.

**Pleriones.** Los PWNs (Pleri6n - *Pulsar Wind Nebulae*) son un tipo de SNR en el que la emisi3n predominante se debe a un púlsar ubicado en su centro que genera vientos ecuatoriales y en algunos casos, chorros de material en la nebulosa. El espectro energ3tico de los PWNs m3s brillantes se describe bien mediante procesos lept3nicos (*Bremsstrahlung* hasta energías de los rayos X y SSC para rayos gamma). El PWN m3s cercano es la Nebulosa del Cangrejo, cuyo espectro de energía de fotones es totalmente compatible con un modelo puramente lept3nico [34]. No obstante, los procesos hadr3nicos tambi3n pueden ocurrir, aunque a tasas menores. Otro PWN muy brillante en rayos gamma es Vela X. A pesar del acuerdo de los modelos lept3nicos con su espectro de fotones, se han sugerido modelos de emisi3n de neutrinos para esta fuente [35]. En dichos modelos se supone que el espectro de rayos gamma es de origen hadr3nico en su totalidad, por lo que deben ser tratados como predicciones optimistas.

**Microcuásares, Binarias de Rayos X.** Los microcuásares son sistemas galácticos binarios de rayos X, típicamente formados por un objeto masivo (una estrella de neutrones o un agujero negro de unas pocas masas solares) y una estrella compa1era [36]. El objeto m3s masivo absorbe materia de su compa1ero originándose un disco de acreci3n. En caso de que haya tambi3n chorros relativistas, el objeto se conoce como microcuásar [37]. La mayor parte de la energía se libera en forma de rayos X debido a la

aceleración de sincrotrón, aunque se observa también una componente de rayos gamma. Debido a las observaciones de rayos gamma y la existencia de posibles escenarios hadrónicos, se han sugerido algunos modelos de emisión de neutrinos [38, 39]. Hasta el momento, no hay evidencias de emisiones de neutrinos procedentes de microcuásares en ANTARES [40, 41] o IceCube [42, 43].

### 1.2.3.2 Fuentes extra-galácticas

Las predicciones de fuentes de neutrinos de alta energía de origen extra-galáctico es una consecuencia natural de la observación de rayos cósmicos de muy alta energía. Los dos tipos de fuente más prometedores, AGN y las explosiones de rayos gamma, GRB (Brotos de Rayos Gamma - *Gamma Ray Burst*) se describen a continuación.

**Núcleos de galaxias activas.** Los AGN consisten en un núcleo muy luminoso en el centro de algunas galaxias que albergan además un SMBH (agujero negro supermasivo - *Supermassive Black Hole*) de unas  $10^6$  a  $10^{10}$  masas solares. La luminosidad se supone que se genera por la enorme acreción de materia debida a la presencia del agujero negro. De esta forma, la energía gravitacional se libera en forma de radiación y partículas. Perpendiculares al disco de acreción se originan dos jets ultrarrelativistas que pueden extenderse hasta varios Mpc. Debido a los frentes de choque alrededor y dentro del disco de acreción, las partículas en los jets pueden ser aceleradas hasta las máximas energías medidas actualmente. Dependiendo de la orientación de los jets con respecto a la Tierra y otras características como la actividad y luminosidad de la emisión en radio y en el óptico, se clasifican en varios tipos [44]. Especialmente interesante son los denominados blazars, que son aquellos AGN con uno de los jets apuntando hacia la Tierra. Los blazars representan una de las fuentes más prometedoras como fuentes puntuales de neutrinos cósmicos. El interés por los blazars como fuente de neutrinos se ha visto motivado recientemente por la primera asociación convincente de neutrinos astrofísicos con un objeto cósmico conocido, el blazar TXS-0506+056 [45, 46].

**Explosiones de rayos gamma.** Los GRBs son los fenómenos más energéticos del Universo (energías de  $10^{44-47}$  eV) [47]. Se caracterizan por una

emisión extremadamente brillante de rayos gamma seguida de un resplandor posterior en rayos X, UV, óptico y radio. Recientemente, se han detectado varios GRBs de muy alta energía ( $> 100$  GeV): GRB 190114C, detectado por MAGIC [48], y GRB 180720B y GRB 190829A, detectados por HESS en [49, 50].

Los GRBs se clasifican según su duración en GRBs de larga duración ( $t > 2$  s) y GRBs de corta duración [51]. Se cree que los de larga duración se originan durante el CCSC (Colapso del Núcleo de una Supernova- *Core Collapse Supernova*) y los de corta duración se deben a la fusión de dos estrellas de neutrones. Esta hipótesis ha sido recientemente respaldada por la observación prácticamente simultánea del GRB170817A de corta duración y la onda gravitacional GW170817, originada por la coalescencia de dos estrellas de neutrones [52]. Los GRBs han sido una de las fuentes candidatas preferidas de neutrinos. De acuerdo con el modelo de la "bola de fuego (*fireball*)" [53], la presión de radiación acelera una bola de fuego a velocidades relativistas. Los hadrones perderían energía por las interacciones fotón-mesón en las ondas de choque de la bola de fuego, lo que daría lugar a emisión de neutrinos. Sin embargo, la ausencia de neutrinos observados en las búsquedas realizadas por IceCube han dado lugar a límites muy estrictos en los flujos predichos para estos modelos [54]. La reciente observación por LIGO de la fusión de dos estrellas de neutrones GW170817 no vino acompañada de una detección de neutrinos en ANTARES o IceCube, lo que aportó información sobre la orientación del eje del sistema [55].

## 1.3 Física de partículas con telescopios de neutrinos

Además de la contribución a la astronomía, tal y como se ha mostrado en los apartados anteriores, los telescopios de neutrinos pueden abordar algunas de las cuestiones fundamentales de la física de partículas más allá del Modelo Estándar como cuál es la naturaleza de la *Materia Oscura*; las oscilaciones de neutrinos a través de los mecanismos estándar de masa-

sabor; la búsqueda de monopolos; y los posibles efectos subdominantes; como aquellos inducidos por la violación de la invarianza de Lorentz o del principio de equivalencia. A continuación, se describen brevemente cada uno de ellos.

### 1.3.1 Búsqueda indirecta de materia oscura

Hoy en día está generalmente aceptado por la comunidad astrofísica que la mayoría de la materia en nuestro Universo está constituida por materia oscura no luminosa. La evidencia indirecta más clara de la existencia de la materia oscura es que las galaxias están girando con una velocidad tan alta, que la gravedad debida a la materia observable de la que están hechas sería incapaz de mantenerlas estables. Debe existir, por tanto, materia adicional que evite que se desgarren. La materia oscura no interactúa a través de la fuerza electromagnética, lo que significa que no absorbe, refleja o emite luz, haciendo extremadamente difícil su detección. Ninguna partícula conocida tiene las propiedades necesarias para explicar la materia oscura, pero entre la larga lista de hipotéticos candidatos, se encuentran las denominadas WIMPs (Partículas Masivas que Interactúan Débilmente - *Weakly Interacting Massive Particles*), que podrían estar formados por partículas supersimétricas.

Los telescopios de neutrinos no son directamente sensibles a las partículas supersimétricas. Sin embargo, se espera que estas partículas sean capturadas gravitacionalmente y queden atrapadas en objetos astrofísicos masivos como el Sol, la Tierra o el centro de la Galaxia. Esto daría lugar a un incremento de su densidad de manera que podrían decaer o aniquilarse dando lugar a partículas del Modelo Estándar, entre las que estarían neutrinos de alta energía, que podrían detectarse en telescopios de neutrinos. ANTARES, por ejemplo, es sensible a estos neutrinos en un amplio rango de masas de partículas supersimétricas. Varios estudios han sido publicados recientemente en ANTARES poniendo límites a la sección eficaz de aniquilación para diferentes masas de estas partículas [56, 57].

### 1.3.2 Oscilaciones de neutrinos

Las últimas décadas han supuesto un enorme avance en nuestro conocimiento de las propiedades de los neutrinos. Los experimentos de neutrinos solares, neutrinos atmosféricos, reactores y aceleradores han permitido medir con buena precisión los parámetros que describen la oscilación de sabores de los neutrinos. Sin embargo, existen todavía ciertas incógnitas muy relevantes, como si existe violación CP en el sector leptónico, el octante en el que está el ángulo de mezcla  $\theta_{23}$ , las masas de los neutrinos, etc. En particular, una de las cuestiones más relevantes entre estas es cuál es el ordenamiento de masas de los neutrinos. Los experimentos de oscilaciones no son sensibles a las masas de los neutrinos, sino solamente a las diferencias de masa. Sin embargo, los telescopios de neutrinos pueden medir el ordenamiento de masas de los neutrinos gracias al efecto de materia sobre las oscilaciones, que produciría una asimetría entre los escenarios de ordenamiento normal o inverso, los dos posibles escenarios. Además de las implicaciones teóricas, la medida del ordenamiento de masas tendría un impacto muy relevante sobre las prestaciones, y por tanto el diseño, esperado para los futuros experimentos destinados a medir la fase  $\delta_{CP}$ , o los que tienen por objetivo determinar si los neutrinos son partículas de Dirac o de Majorana, ambas cuestiones también con implicaciones teóricas de gran interés científico.

### 1.3.3 Búsqueda de Monopolos Magnéticos

La mayor parte de las GUTs (Teorías de Gran Unificación - *Grand Unified Theory*) predicen la creación de MMs (Monopolo Magnético - *Magnetic Monopole*) en el Universo primigenio. Los MMs son topológicamente estables y tienen una carga magnética definida como un múltiplo entero de la carga de Dirac:

$$g_D = \hbar c / 2e,$$

donde  $e$  es la carga eléctrica elemental,  $c$  la velocidad de la luz en el vacío y  $\hbar$  la constante de Planck. Dependiendo de la GUT, las masas inferidas de los MM pueden tener unos valores que varían en varios órdenes de magnitud, de  $10^5$  a  $10^{14}$  TeV. Los MM son partículas estables y habrían sobrevivido



hasta hoy. Recientemente se han llevado a cabo búsquedas de monopolos magnéticos con el telescopio de neutrinos ANTARES sin haber encontrado evidencias claras de su existencia, aunque se han puesto límites a su flujo [58].

### 1.3.4 Violación de la invariancia Lorentz

Las teorías de gravedad cuántica asumen que el espacio-tiempo tiene una naturaleza espumosa. Las interacciones con este espacio-tiempo podrían llevar a la ruptura de la simetría de CPT (Carga eléctrica, paridad y sentido del tiempo - *Charge, Parity and Time Reversal*), llevando a su vez a la violación de la invariancia Lorentz. Además, algunas de las teorías de gravedad cuántica predicen que existe una escala de longitud mínima, del orden de la longitud de Planck ( $10^{35}$  m). La existencia de una escala de longitud fundamental podría también inducir una violación de la invariancia de Lorentz. La invariancia de Lorentz podría manifestarse de muchas formas y testearse con diferentes sistemas experimentales, en particular con una modificación de la longitud de oscilación de los neutrinos.

## 1.4 Principio de detección en los telescopios de neutrinos

### 1.4.1 Introducción

La idea original de los telescopios de neutrinos se debe a Moisey Alexandrovich Markov, quién en el ICRC (Conferencia Internacional de Rayos Cósmicos - *International Cosmic Ray Conference*) de 1960 propuso [59]

“setting up apparatus in an underground lake or deep in the ocean in order to separate charged particle directions by Cerenkov radiation”.

La idea básica de un telescopio de neutrinos consiste en la instalación de una matriz de detectores de luz en un medio transparente. Este medio, como por ejemplo hielo o agua, proporciona grandes volúmenes para aumentar la

probabilidad de la interacción de los neutrinos, proporciona apantallamiento contra las partículas secundarias producidas por los rayos cósmicos y permite la transmisión de los fotones Cherenkov emitidos por las partículas relativistas que se producen durante la interacción de los neutrinos.

Los neutrinos de alta energía interaccionan con un nucleón  $N$  del núcleo mediante la interacción débil, ya sea vía CC (Interacciones de Corriente Cargada - *Charged Current Interactions*)

$$\nu_l + N \rightarrow l + X$$

o de NC (Interacciones de Corriente Neutra - *Neutral Current Interactions*)

$$\nu_l + N \rightarrow \nu_l + X,$$

siendo  $l$  un leptón ( $e, \mu$  o  $\tau$ ) y  $X$  una cascada hadrónica.

Los telescopios de neutrinos de alta energía (en el rango de los TeV a los PeV) se basan en la detección de los fotones Cherenkov inducidos por las partículas relativistas producidas en las interacciones de neutrinos. La luz Cherenkov es detectada por la matriz tridimensional de detectores de luz, PMTs (Fotomultiplicador - *PhotoMultiplier Tube*), mencionada anteriormente. La información proporcionada por el número de fotones y los tiempo de llegada de los mismos es utilizada para inferir el sabor del neutrino, su dirección y su energía.

Las partículas cargadas pueden viajar a través del agua o el hielo hasta que interaccionan o se desintegran. La distancia media recorrida por la partícula se denomina alcance de la partícula y depende de su pérdida de energía en el medio. Si el alcance excede la resolución espacial del detector, entonces es posible determinar la trayectoria de la partícula.

## 1.4.2 Interacciones de neutrinos

En un telescopio de neutrinos se distinguen dos clases principales de eventos: eventos tipo traza y eventos tipo cascada. Los sucesos tipo traza se producen principalmente por muones relativistas cuyo alcance les permite recorrer grandes distancias a través del medio, emitiendo luz de Cherenkov de

manera constante a lo largo de su trayectoria. Los sucesos tipo cascada se producen por las cascadas hadrónicas o electromagnéticas y se caracterizan porque la emisión de luz tiene simetría esférica. A continuación, se describen con más detalle ambas signaturas.

**Interacciones CC de neutrinos muónicos.** Cuando un neutrino muónico interactúa con un nucleón a través de la interacción CC, se produce una cascada hadrónica y un muón. Dependiendo de la energía que se haya transferido al leptón, el muon puede propagarse desde unos cuantos metros ( $E \approx 1$  GeV) hasta varios kilómetros ( $E > 1$  TeV), produciendo una traza de gran longitud antes de desintegrarse en un electrón. Consecuentemente, los neutrinos muónicos son especialmente interesantes para la búsqueda de fuentes puntuales de neutrinos con energías superiores a 1 TeV. En este rango de energías la interacción del  $\nu_\mu$  puede ocurrir fuera del detector, pero el muon tiene la suficiente energía para atravesar completamente el detector. Esto permite la reconstrucción de la trayectoria del muón, y a su vez reconstruir la dirección del neutrino que lo origina, debido a la gran correlación entre ambas direcciones. El ángulo medio  $\theta_{\nu\mu}$  entre el neutrino que incide y el muon resultante viene dado, aproximadamente, por la siguiente relación:

$$\theta_{\nu\mu} \leq \frac{0.6^\circ}{\sqrt{E_\nu(\text{TeV})}}$$

donde  $E_\nu$  es la energía del neutrino. Para energías superiores a 10 TeV, el ángulo promedio es menor que  $0.2^\circ$ . Como los neutrinos no se ven afectados por los campos magnéticos interestelares, es posible trazar la trayectoria del muon hasta la fuente del neutrino original.

**Interacciones CC de neutrinos electrónicos.** En este caso se producen un electrón y una cascada hadrónica. A su vez, el electrón, al ser de alta energía es capaz de producir radiación de *bremssstrahlung* en unas pocas decenas de centímetros de agua/hielo dando lugar a una cascada electromagnética. Puesto que ambas cascadas se producen en el mismo vértice de interacción, es imposible distinguirlas y lo que se observa es un suceso tipo cascada. Las partículas relativistas producidas dan lugar a radiación Cherenkov, sin embargo, la extensión longitudinal de la cascada es del orden de unos pocos

metros, por lo que el suceso se observa como una fuente puntual de fotones Cherenkov emitidos casi isotrópicamente a lo largo del eje de la cascada. Por esta razón, la resolución angular de este tipo de sucesos es mucho peor que la resolución angular de los sucesos muónicos. Por otra parte, al depositarse toda la energía del neutrino en una zona más reducida, se consigue una mejor reconstrucción de su energía.

**Interacciones CC de neutrinos tau.** En las interacciones de corriente cargada de  $\nu_\tau$ , el leptón tau producido tiene una vida media muy corta ( $2.9 \times 10^{-13}$  s) y, dependiendo de su energía, puede viajar hasta unas decenas de metros antes de desintegrarse en un electrón o muon (35% de probabilidad) o en hadrones (65% de probabilidad). En el caso de que se desintegre en un muon se observa un suceso tipo traza. En caso contrario se observará un suceso tipo cascada. Si la trayectoria del leptón tauónico es lo suficientemente larga antes de desintegrarse para distinguir entre la interacción primaria del  $\nu_\tau$  y la desintegración del  $\tau$  (normalmente para energías superiores a 1 PeV e inferiores a 20 PeV) el patrón observado es el de una cascada, más una traza, más otra cascada. Este patrón se denomina *double bang event*. En cambio, para energías inferiores a 2 PeV y por encima de 20 PeV, la topología observada es la de una cascada y una traza (*lollipop event*) ya que la segunda cascada no se puede distinguir de la inicial (bajas energías), o se desarrolla fuera del detector pues el alcance del  $\tau$  es superior a las dimensiones del detector ( $\sim$ km).

**Interacciones de Corrientes Neutras.** El canal de NC produce el mismo patrón para todos los sabores de neutrinos. En el vértice de interacción se producen un neutrino y una cascada hadrónica. Una parte de la energía de la interacción se la lleva el neutrino saliente, que no es observado, y el resto se deposita en el detector. Esto hace que la reconstrucción de la energía del neutrino entrante sea mucho más difícil.

### 1.4.3 Radiación Cherenkov

Las partículas cargadas producidas en las interacciones de neutrinos de alta energía son principalmente relativistas, y por lo tanto son capaces de inducir radiación de Cherenkov [60]. Cuando una partícula cargada atraviesa un medio transparente a una velocidad superior a la velocidad de la luz en ese

medio, polariza las moléculas a lo largo de su trayectoria, induciendo un momento dipolar. Los fotones de Cherenkov se emiten cuando se restablece el equilibrio, formándose un frente de luz coherente en forma de cono con un ángulo respecto a la dirección del leptón  $\theta_C$  dado por

$$\cos(\theta_C) = \frac{1}{\beta \times n}$$

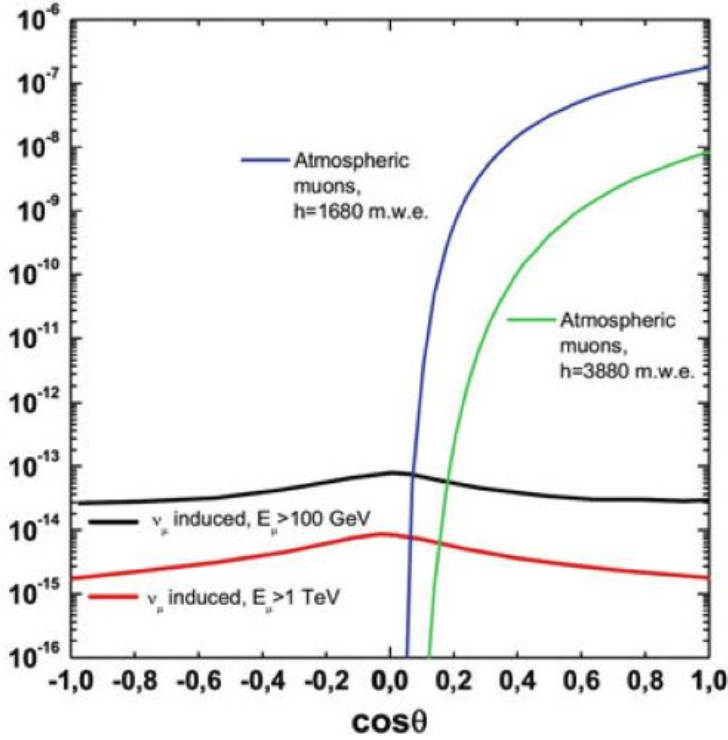
donde  $n$  es el índice de refracción del medio y  $\beta$  es la velocidad de la partícula en unidades de  $c$ . Para partículas relativistas ( $\beta \sim 1$ ) viajando en agua ( $n = 1.364$ ) el ángulo de Cherenkov es  $\theta_C = 43^\circ - 46^\circ$ .

#### 1.4.4 Fondo Físico

Los telescopios de neutrinos de alta energía no están libres de sucesos de fondo. Las dos fuentes principales de fondo físico son los *muones atmosféricos* y los *neutrinos atmosféricos*. Ambos se producen principalmente por la desintegración de piones y kaones cargados originados en las cascadas hadrónicas producidas por las interacciones de los rayos cósmicos que interactúan con los núcleos de la atmósfera.

A pesar de que los telescopios de neutrinos se sitúan a grandes profundidades para reducir el fondo, los muones de alta energía son muy penetrantes pudiendo atravesar la atmósfera e incluso penetrar hasta varios kilómetros de hielo y agua. Además, el flujo de muones atmosféricos es varios órdenes de magnitud mayor que el flujo de neutrinos atmosféricos, y representa la mayor parte de los eventos reconstruidos en cualquier detector de neutrinos de gran volumen. Sin embargo, los muones no pueden atravesar todo el diámetro de la Tierra. Por lo tanto, un método efectivo para rechazar este fondo es seleccionar solo eventos cuya dirección se ha reconstruido hacia arriba (*up-going events*). No obstante, existe un porcentaje de sucesos descendentes que son reconstruidos erróneamente como ascendentes y que hay que rechazar mediante estrategias adicionales.

Los neutrinos atmosféricos representan una fuente irreducible de fondo puesto que pueden cruzar la Tierra sin interactuar. Para identificar la señal procedente de neutrinos cósmicos, se emplean diferentes técnicas dependiendo del tipo de análisis. En las búsquedas de fuentes puntuales y extensas



**Fig. 1.5:** Flujo de neutrinos atmosféricos y de muones atmosféricos para dos profundidades diferentes y para dos límites de energía diferentes. Figura tomada de [61]

de neutrinos cósmicos, se espera que los eventos de señal se acumulen en torno a las proximidades de la fuente y puedan distinguirse de los neutrinos atmosféricos ya que estos últimos se distribuyen isotrópicamente sobre el cielo. En las búsquedas de flujos difusos, donde la estrategia anterior no es válida, se aprovecha el hecho de que la señal y el fondo presentan una distribución energética diferente, siendo la de los neutrinos cósmicos más pronunciada hacia altas energías. En la Figura 1.5 se puede observar el flujo de muones atmosféricos y el flujo de muones inducidos por neutrinos atmosféricos en función del coseno del ángulo cenital.

El flujo de muones atmosféricos excede el flujo inducido por las interacciones de los neutrinos atmosféricos en muchos órdenes de magnitud, disminuyendo con el aumento de la profundidad y desaparece para direcciones

ascendentes. Esta es la razón por la cual los telescopios de neutrinos, al contrario que los telescopios convencionales, miran hacia abajo y observan el cielo del hemisferio opuesto. Se observa un aumento del flujo de neutrinos atmosféricos para sucesos producidos en el horizonte ( $\cos(\theta) = 0$ ) debido a que la densidad del aire disminuye con la altura y por lo tanto, los piones horizontales recorren una distancia mayor sin interactuar, aumentando la probabilidad de desintegración y por tanto de producir neutrinos.





# Telescopios de neutrinos

## 2

” *Nature composes some of her loveliest poems for the microscope and the telescope.*

— Theodore Roszak

## 2.1 Introducción

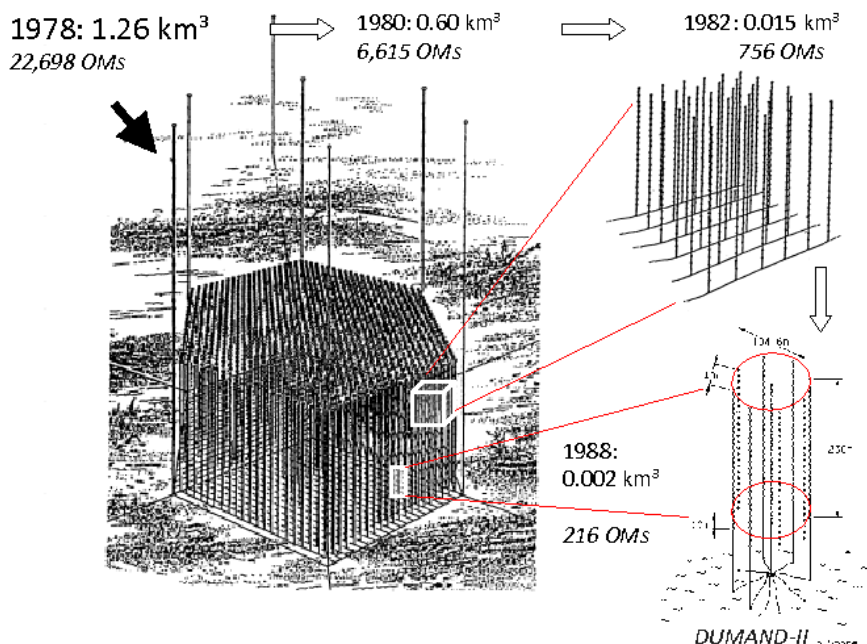
Los telescopios de neutrinos son infraestructuras relativamente recientes. En este capítulo se presentan todos los telescopios de neutrinos proyectados o existentes a día de hoy, comenzando por el primero en proponerse, DUMAND (Deep Underwater Muon And Neutrino Detector), y acabando por KM3NeT, actualmente en construcción. Cada sección, además de realizar una breve presentación del telescopio se centra también en la electrónica de adquisición y la instrumentación utilizada. En el caso de la instrumentación de ANTARES y KM3NeT y para la electrónica de adquisición de KM3NeT, al ser el objeto de la presente tesis, se detallan en el Bloque II de las publicaciones.

## 2.2 El inicio de la historia de los telescopios de neutrinos: DUMAND

En septiembre de 1976, en Waikiki, Hawái se inició la era de los telescopios de neutrinos con el nacimiento de DUMAND [62]. Si bien el proyecto fue cancelado por el Departamento de Energía de Estados Unidos en 1995, el proyecto DUMAND realizó numerosos estudios oceánicos e incluso realizó medidas experimentales en las costas de Hawái midiendo la intensidad el flujo de muones en función de la profundidad. Actualmente DUMAND se considera el precursor de los telescopios que habrían de venir posteriormente [63].

El experimento trató de instalar una matriz de detectores en una cuenca de subsidencia situada a unos 30 km de la costa de la isla de Hawái a una profundidad de 4.8 km. La Figura 2.1 muestra la evolución de las diferentes propuestas realizadas para DUMAND a lo largo del tiempo. En 1980 comenzó el programa experimental con una serie de pruebas para estudiar el *background* debido a la radioactividad del Potasio 40 y a la biolu-

miniscencia. En 1987 este programa acabó exitosamente con la instalación (DUMAND I) de un prototipo de línea desde un barco. Esta línea ya contenía todo lo necesario para la operación permanente de un detector mayor, funcionando durante varias horas a diferentes profundidades y midiendo el flujo de muones atmosféricos.

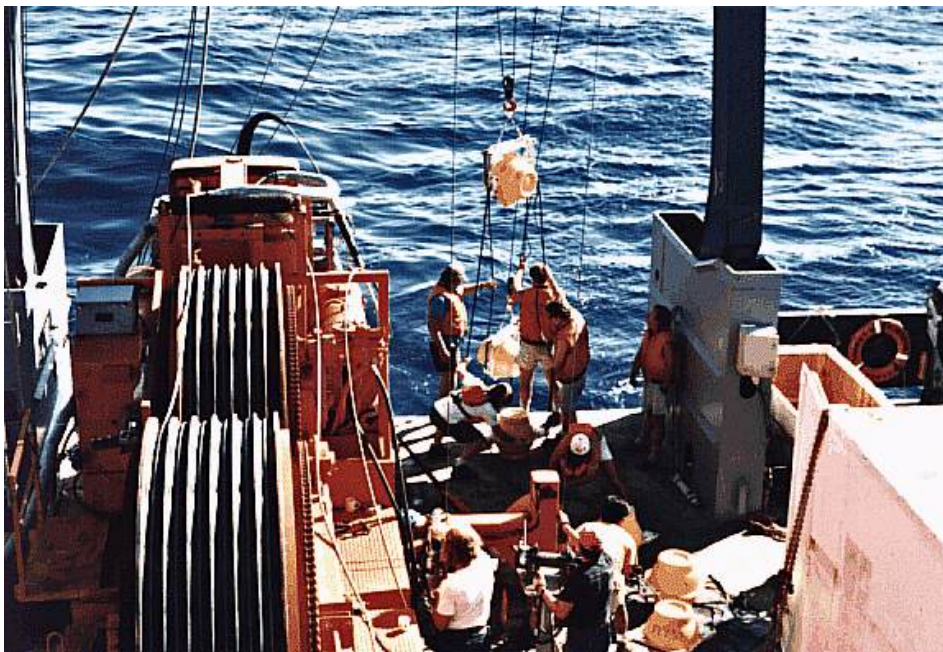


**Fig. 2.1:** Evolución de las diferentes propuestas para DUMAND a lo largo del tiempo. Figura tomada de [64].

El siguiente paso consistió en la construcción de un detector permanente (DUMAND II) [65] en dos etapas: primero con la instalación de tres líneas, con 24 OM's (Módulo Óptico - *Optical Module*) cada una, y posteriormente de otras seis más para completar un total de nueve líneas y 216 OM's.

Cada OM contenía un PMT (Fotomultiplicador - *PhotoMultiplier Tube*) de 40 cm de diámetro albergado en una esfera de vidrio. La electrónica alojada en la esfera proporcionaba el tiempo de *readout*, la carga del pulso y el estado del OM. La carga del pulso del PMT se transformaba en una señal digital con una duración proporcional a la carga y se transmitía por una fibra óptica al SC (Controlador de Línea - *String Controller*). Una vez en el SC, las señales de los 24 OM's se digitalizaban, multiplexaban y se transmitían

a la costa mediante fibras de modo simple trabajando a 500 Mbps. Tanto la digitalización como el multiplexado se realizaba por parte del mismo circuito integrado.



**Fig. 2.2:** Fotografía de la instalación de la operación marina para la instalación de la primera línea de DUMAND.

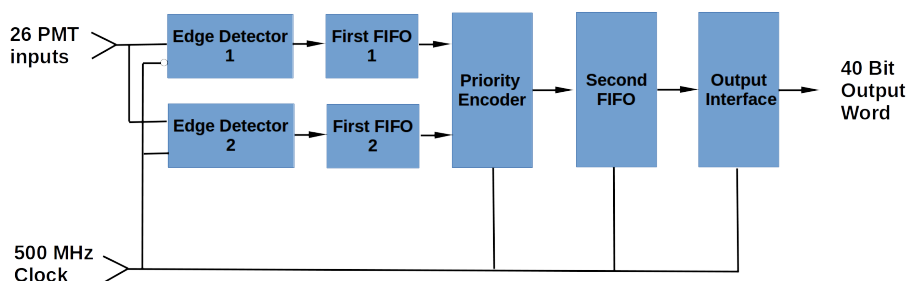
### 2.2.1 Electrónica de adquisición de DUMAND

Para la digitalización de los pulsos de los PMTs se utilizaba un circuito [66] con 27 canales, con una resolución de un nanosegundo, un *buffer* de dos pulsos por PMT y una tasa de transmisión de 100 kHz por canal como máximo. También se requería un fiabilidad de al menos diez años de MTBF (Tiempo Medio Entre Fallos - *Mean Time Between Failures*).

La tecnología seleccionada fue una *gate array* (precursores de las FPGAs (Matriz de Puertas Programables - *Field-Programmable Gate Array*)) de GaAs (Arseniuro de Galio - *Gallium Arsenide*). El diseño de un ASIC (Circuito Integrado de Aplicación Específica - *Application-Specific Integrated Circuit*) *full-custom* fue descartado porque era demasiado costoso. Por otra parte se seleccionó el GaAs ya que esta tecnología proporcionaba la velocidad y

el consumo requerido por DUMAND. En cambio se consideró que CMOS (Semiconductor Complementario de Óxido Metálico - *Complementary Metal-Oxide-Semiconductor*) resultaba demasiado lento mientras que ECL (Lógica de Emisores Acoplados - *Emitter-Coupled Logic*) presentaba un consumo demasiado elevado. El IC (Circuito Integrado - *Integrated Circuit*) seleccionado finalmente fue el VGFX200K DCFL, una *gate array* de Vitesse, un *chip* con unos requerimientos de velocidad y consumo adecuados.

El digitalizador procesaba las señales de los 26 canales en paralelo y empaquetaba la información, después de comprimirla y enviarla a la estación de la costa. La precisión de un nanosegundo se consiguió con un reloj de 500 MHz, utilizando los dos flancos del reloj. Para conseguirlo se aumentó la complejidad del circuito, permitiendo que ambos flancos se procesaran en paralelo. Además, se añadió una circuitería adicional que aseguraba la preservación de la cronología de los eventos de forma que los eventos que llegaban a la costa estuvieran ordenados en el tiempo. No se utilizó un reloj de 1 GHz debido a la atenuación que se produce dentro del IC y especialmente a que los retrasos del reloj, a esta frecuencia, son excesivos y se introducen incertidumbres importantes en la distribución en el IC.



**Fig. 2.3:** Diagrama de bloques del ASIC que implementa la electrónica de *readout* de DUMAND. Diagrama tomado de [66].

Los principales componentes de esta electrónica, cuyo diagrama de bloques principal se presenta en la Figura 2.3, son:

**Detector de Flanco:** Asigna las señales que vienen de los PMTs a *bines* discretos en el tiempo. El detector de flanco también proporciona supresión de cero al disparar el circuito solo cuando ocurre una transición en la entrada. Se utiliza tanto el flanco de subida como el de bajada del reloj mediante

dos circuitos separados, empleando uno de ellos un reloj desplazado 180 grados.

**Time Stamp:** Se almacena un *time stamp* de 10 bits por cada nanosegundo en el que hay datos válidos. El registro que almacena el tiempo se desborda cada 1024 nanosegundos ( $2^{10}$ ), insertándose en los datos una palabra especial cuando esto ocurre. De esta manera, el procesador del *trigger* en la costa puede reconstruir de forma precisa el tiempo de los eventos.

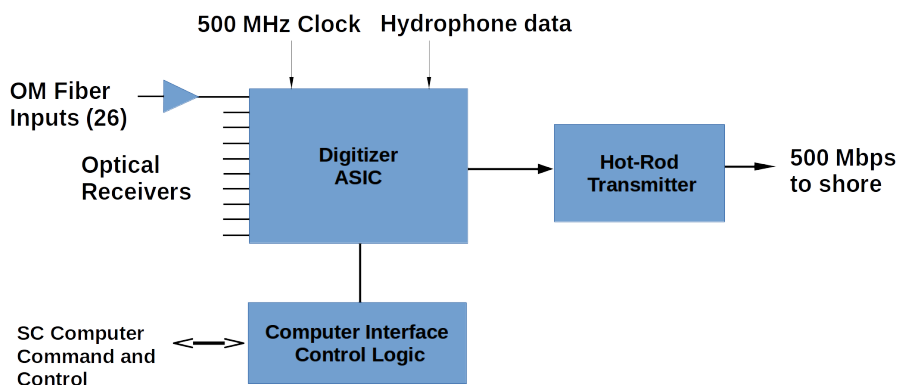
**Primera FIFO (Primero en Entrar Primero en Salir - First Input First Output):** Este bloque proporciona un *buffer* para los sucesos de muchos *hits* en los PMTs. El codificador de prioridad tarda dos nanosegundos en tratar un canal, lo cual implica que se necesita una cola para tratar dichos sucesos. Para la distribución temporal de la entrada se asume que con una profundidad de diez elementos es suficiente. Existen dos FIFOs separadas para gestionar el tiempo de subida y el tiempo de bajada.

**Codificador de Prioridad:** Este bloque identifica aquellos canales donde se da una transición. Si hay más de una transición en el mismo nanosegundo entonces el codificador crea una palabra diferente para cada transición, ordenadas desde el menor al mayor canal. La gestión de cada transición requiere dos nanosegundos.

**Segunda FIFO:** El codificador de prioridad genera datos en ráfagas, pero el ancho de banda del canal de comunicación solo necesita tramitar la media siempre que haya el suficiente *buffer*. Para este objetivo se coloca una FIFO con una capacidad de 100 palabras, ya que este número se considera suficiente para gestionar la generación de datos.

Los datos digitalizados se transmiten por fibra óptica a la costa a 500 Mb/s, utilizando un *chip* comercial de GaAs llamado *Hot-Rod*. El interfaz de salida proporciona los datos al *chip* de transmisión en el formato que este espera (una palabra de 40 bits cada 80 ns). Cada transición a la entrada de los PMTs (un flanco de subida o de bajada) genera una palabra de 16 bits. El formato de esta palabra es de cinco bits para el número de canal, diez bits para el tiempo y un bit para indicar la dirección de la transmisión. Se utiliza una palabra de 40 bits para empaquetar dos transiciones, siendo ocupado el resto (ocho bits) por *flags* o banderas de error.

La lógica se desarrolló mediante un CAE (Ingeniería Asistida por Ordenador - *Computer-Aided Engineering*) de *Mentor Graphics* y se simuló en otra herramienta de *Mentor Graphics* (*Quicksim*). El fabricante del *gate array*, Vitesse, proporcionó una librería de *macros*, compatibles con el sistema de *Mentor Graphics*. El diseño final contenía unos 200000 transistores, el equivalente a 66000 puertas de dos entradas).



**Fig. 2.4:** Diagrama de bloques de la tarjeta electrónica de digitalización. Diagrama tomado de [66].

Se diseñó una PCB (Placa de Circuito Impreso - *Printed Circuit Board*) de ocho capas en la cual integrar el ASIC y el resto de la electrónica asociada. El diagrama de bloques de esta tarjeta se puede observar en la Figura 2.4. Las señales de los PMTs entran en la tarjeta a través de fibras óptica provenientes de los OM y en esta son convertidas a señales eléctricas por receptores ópticos. Las señales son entonces llevadas al ASIC a través de *microstrips* de impedancia controlada. Los datos digitalizados en el ASIC son enviados al *Hot-Rod*, *chip* que los serializa y los envía a la costa. La tarjeta también contiene una interfaz al ordenador del SC, el cual permite realizar las funciones de diagnóstico y control que pueden ser activadas desde la estación de control de la costa. Los receptores de los OM se pueden ajustar individualmente para compensar cambios en la atenuación de la fibra, o para evitar que PMTs averiados puedan sobrecargar el sistema.



## 2.3 Baikal - NT200 - GVD

### 2.3.1 Los orígenes

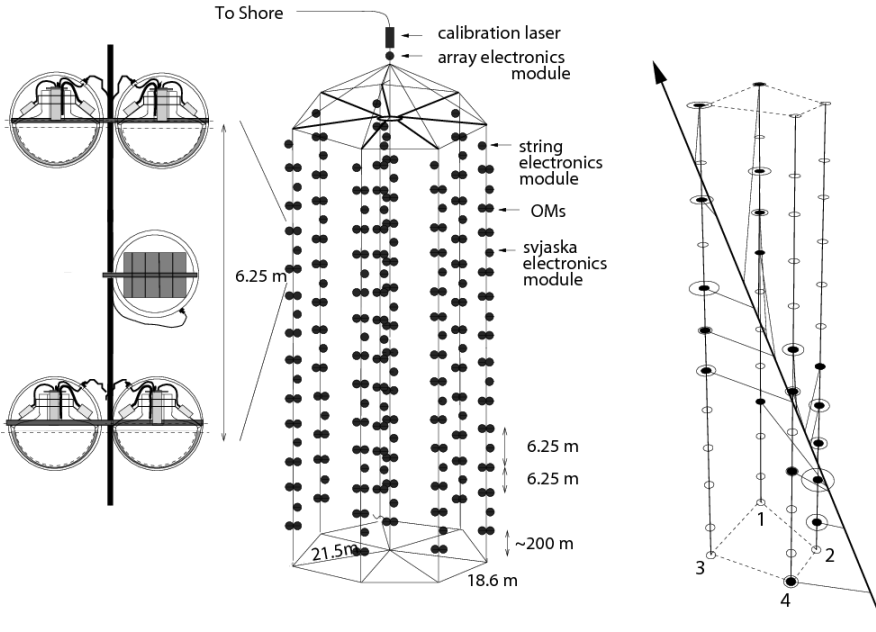
Baikal es la segunda colaboración creada con el fin de construir un telescopio de neutrinos. Actualmente sigue activa, planteando la construcción de un telescopio de dimensiones de kilómetro cúbico, GVD (Gigaton Volume Detector).

Los orígenes de la colaboración Baikal se encuentran en DUMAND, ya que la mayoría de los científicos rusos que trabajarían más tarde en Baikal formaron parte de DUMAND, que llegó a celebrar dos *workshops* en Rusia, uno de ellos en el mismo lago Baikal. Esta participación se acabó cuando la administración Reagan obligó a acabar con la cooperación a partir de la invasión de Afganistán por parte de la Unión Soviética [64]. En 1980 se fundó el *Laboratorio de Astrofísica de Neutrinos de Alta Energía* que sería el núcleo principal de la colaboración Baikal. La primera línea estacionaria de OMs, denominada Girlanda-84, se instaló en 1984 y contenía 12 PMTs, los cuales estuvieron operativos durante 50 días. La línea permitía la detección de muones atmosféricos y la investigación de las características a largo plazo de la bioluminiscencia en el lago Baikal. La línea se conectaba a la costa por un cable de siete hilos que se instaló también ese mismo año [67].

### 2.3.2 Neutrino Telescope 200

El siguiente paso fue el diseño de un telescopio de neutrinos de gran escala, el NT200 (Neutrino Telescope 200) con un área efectiva de detección de entre  $2 \times 10^3 \text{ m}^2$  y  $10 \times 10^3 \text{ m}^2$  dependiendo de la energía de la partícula. La matriz de OMs, que contenía un total de 192 PMTs, se instaló entre 1988 y 1992. NT200 ha sido el primer telescopio de neutrinos submarino en entrar en operación. NT200 utilizaba una fuente de luz láser sumergida para caracterizar las propiedades ópticas del agua. La Figura 2.5 muestra la arquitectura principal utilizada en NT200.





**Fig. 2.5:** Esquema de la arquitectura de NT200. Figura tomada de [64].

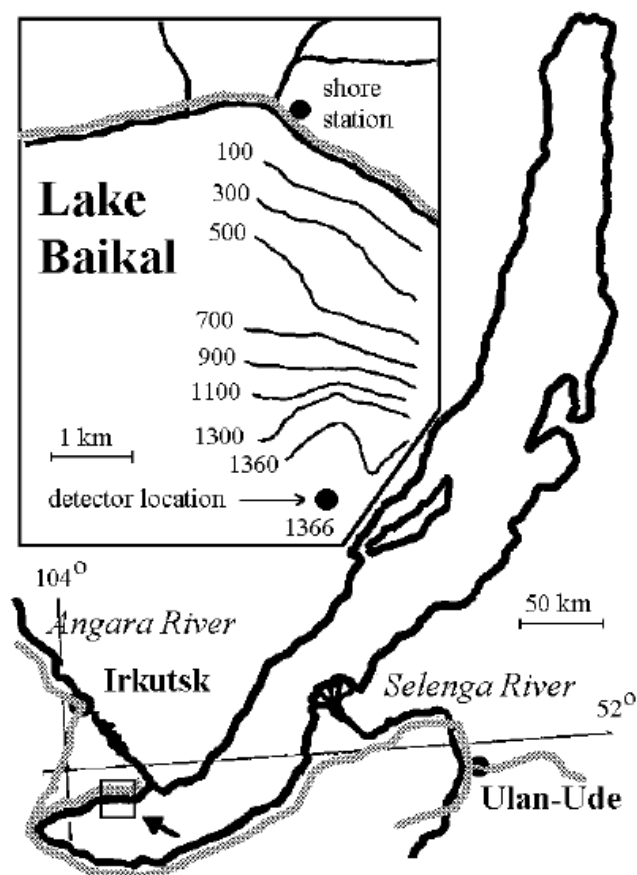
### 2.3.3 GVD

En 2006 se continuó con los primeros trabajos para la creación de GVD, también en el lago Baikal. La fase de investigación y desarrollo empezó con los *tests* en el lago de los nuevos PMTs Hamamatsu (R8055 y R7081) y los nuevos controladores del sistema de adquisición. Durante el periodo 2008-2010 los elementos básicos del detector, como los nuevos OMs, las unidades de adquisición o el sistema de *trigger* fueron instalados y testeados en prototipos de líneas en el lago Baikal. Actualmente la colaboración Baikal sigue trabajando para completar GVD.

### 2.3.4 El emplazamiento de GVD

El emplazamiento elegido para el experimento se encuentra al sur del lago Baikal. Las coordenadas geográficas del detector son 51°50' N 104°20' E (ver Figura 2.6). En esta parte del lago hay una infraestructura adecuada para facilitar la instalación y operación del detector. La profundidad del lago

es de 1300-1400 m y tiene una base plana de varias decenas de kilómetros cuadrados por lo que hay volumen suficiente para la instalación de un telescopio de neutrinos. Desde febrero a abril el lago está cubierto por una capa de hielo de más de un metro de grosor por lo que es posible trabajar directamente en la superficie del lago para instalar y mantener del detector.



**Fig. 2.6:** Localización del detector en el lago Baikal[68].

## 2.4 JULIA: detección de neutrinos en las Canarias

JULIA (Joint Underwater Laboratory and Institute for Astroparticle physics) es un experimento que llegó a instalar, a principios de 1991, tres sensores ópticos en una línea vertical de 4 m de longitud en aguas cercanas a las islas Canarias [69]. El espaciado entre los módulos ópticos (2 m) era menor al de DUMAND ya que trataban de detectar neutrinos de media y baja energía. Los principales aspectos que se querían testear eran un nuevo tipo de PMT (al que llamaban *smart* PMT) y una transmisión analógica de los datos desde los OMs al barco a través de fibras ópticas. Estas fibras tenían una longitud de 1 km por lo que esta fue la profundidad máxima a la que llegaron los OMs. Las señales producidas por la electrónica del OM y enviadas por la fibras se procesaban en el barco con electrónica convencional NIM (Módulo de Instrumentación Nuclear - *Nuclear Instrumentation Module*) y CAMAC (Control y Medida Asistido por Ordenador - *Computer-Aided Measurement And Control*).

### 2.4.1 Electrónica de adquisición del OM

En JULIA cada OM contiene una electrónica de adquisición que digitaliza los datos proporcionados por los PMTs. Dicha electrónica esta basada en el circuito denominado DMQT que se encarga de integrar la carga del pulso del PMT, a la vez que proporciona un pulso ECL proporcional a la carga. Este pulso se introduce en un circuito con un diodo láser que proporciona una señal lumínica de igual duración que el pulso ECL que se transmite por medio de una fibra óptica a la costa.

Los OMs utilizados en el primer test de JULIA carecían de CPU (Unidad de Procesamiento Central - *Central Processing Unit*), normalmente un microcontrolador encargado de monitorizar y controlar el OM. En una configuración futura, este debería de haberse incorporado ya que es necesario para una operación autónoma y permanente del OM.

Las características principales que cumplía esta electrónica eran:

- Era autodisparable.
- Debía trabajar linealmente con respecto a la resolución del PMT utilizado. Esto se consigue realizando una integración de la carga. Además esta integración se debe realizar de una forma rápida para evitar tiempos muertos grandes.
- Debe tener bajo *jitter*.
- Las salidas deben ser *norm-pulses* para permitir un procesamiento posterior sencillo. El circuito de *readout*, el *DMQT*, mide la carga integrada con buena linealidad y precisión temporal. La integración de los pulsos tiene lugar en paralelo a su recogida, de este modo el tiempo de conversión es proporcional a la carga integrada. Al contrario de los circuitos integradores con una ventana de integración fija, el *DMQT* tiene un tiempo muerto bajo para señales pequeñas (de alrededor de 130 ns para un PE (FotoElectrón- *PhotoElectron*). Cada PE adicional incrementa este número en alrededor de 80 ns.
- La anchura del pulso de salida en ECL da el valor de la carga integrada, y el flanco de subida la información temporal del pulso del PMT. La información temporal se obtiene con un umbral bajo (de aproximadamente 10 mV). Una coincidencia de un segundo umbral (de alrededor de los 100 mV) en los cinco segundos posteriores al primer umbral proporciona un *trigger* seguro y elimina cualquier ruido en el PMT.

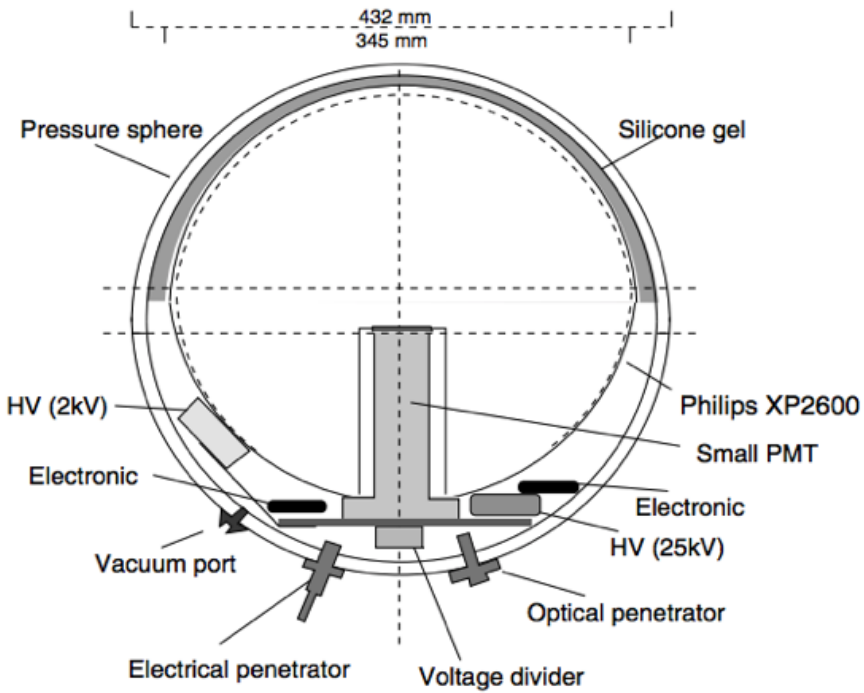
Este circuito sería la base del EOM (Módulo Óptico Europeo- *European Optical Module*) de DUMAND II, cuyo esquema principal se muestra en la Figura 2.7. En la siguiente sección veremos más detalles de este circuito.

JULIA no avanzó mucho más debido a la falta de fondos pero fue útil para Baikal y DUMAND II, siendo su electrónica de *readout* la base utilizada por el EOM de DUMAND II [70].

## 2.4.2 Características del *DMQT* del EOM - DUMAND II

El circuito está directamente alimentado por la señal del ánodo del PMT. La salida digital ECL opera un circuito controlador de un LED. El flanco de subida de la señal de salida tiene un retraso de alrededor de 10 ns con

respecto al inicio de la señal original del PMT. El circuito se auto dispara. Para evitar ruido en el PMT el circuito tiene un discriminador con un límite a 0.2 PE.



**Fig. 2.7:** Esquema del EOM cuyo desarrollo se inició dentro de la colaboración JULIA y se planificó para su utilización en DUMAND II [70].

El circuito mide la respuesta en tiempo del PMT. Un segundo límite discriminador se coloca a un valor inferior (aproximadamente 0.05 PE). Este límite obtiene el flanco de subida de la señal del PMT sin que esta se vea afectada por fluctuaciones del tiempo de subida. Una coincidencia en el límite superior define el *trigger* y empieza el pulso de salida. Ambos límites se pueden configurar y monitorizar por la RCU (Unidad de Control Remoto - *Remote Control Unit*).

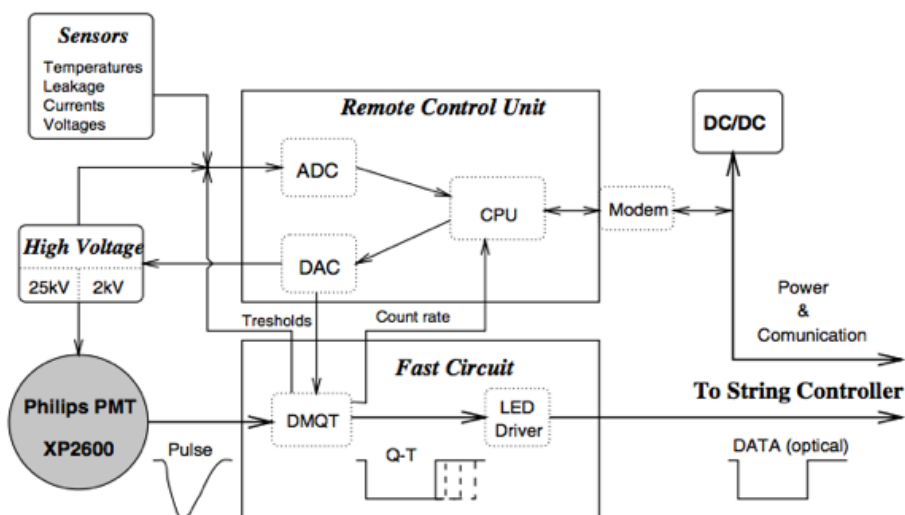
El circuito mide linealmente la carga integrada de las señales de los PMTs. La duración tiene que ser proporcional a la carga integrada. La integración mínima debe de ser de alrededor de 150 ns para obtener una buena re-

solución de energía. Mayores amplitudes requieren una integración más larga.

Después de un corto período (alrededor de 40 ns) la conversión comienza durante la recogida de carga. Además, la conversión se hace con una duración variable. Esto lleva a pequeños tiempos de conversión para frecuencias de pulsos de un solo PE y requiere mayores cantidades de tiempo para señales de PMTs mayores. Todo el proceso conlleva un *dead-time* o tiempo muerto de 150 ns para un PE más 100 ns para cada PE adicional.

Estos valores se obtuvieron con el prototipo para el experimento JULIA. Sin embargo las tarjetas producidas para DUMAND II tenían un tiempo muerto de aproximadamente 200 ns por PE. Igualmente, la resolución de energía no alcanza los excelentes valores de los prototipos de *DMQT*.

El diagrama de bloques del sistema de *readout* y de temporización interna está mostrado en la Figura 2.8. Una fuente de corriente bipolar carga y descarga la capacidad de integración. La corriente se controla mediante la amplitud del pulso de entrada y la corriente de control, la cual empieza la conversión después de un tiempo fijo. El circuito está fabricado en tecnología ECL y tiene un consumo de potencia de alrededor de 2.5 W.



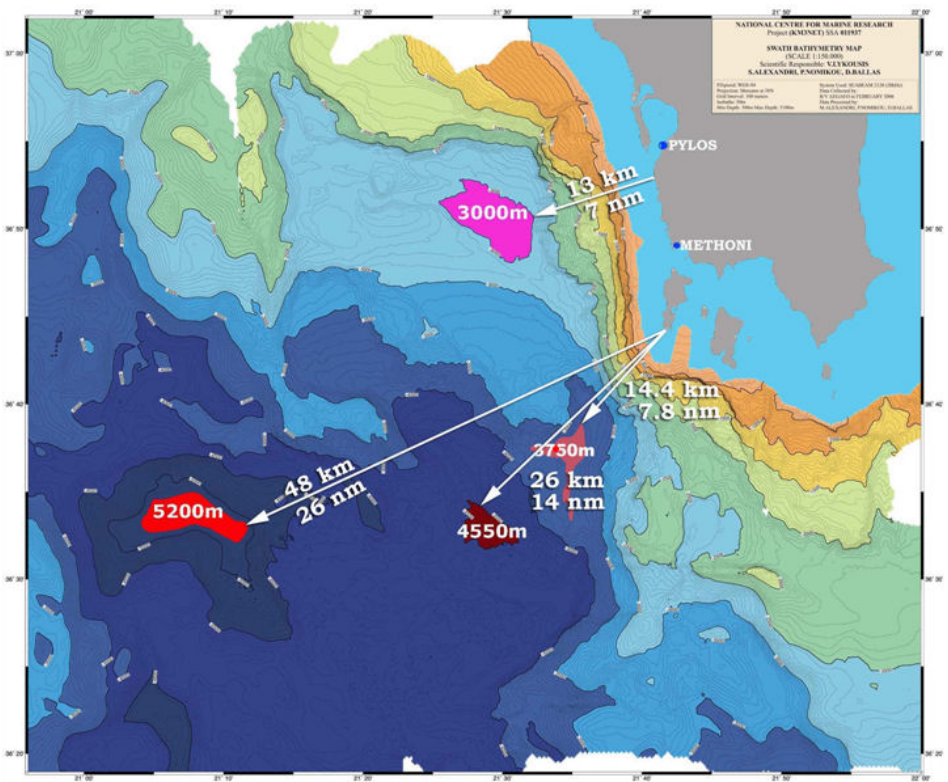
**Fig. 2.8:** Diagrama de bloques del sistema de *readout* del EOM para DUMAND II [70].

Para testear la linealidad de la conversión QT (Carga-Tiempo) se ilumina un PMT con un LED fijado a una intensidad media de alrededor de cuatro PEs. Cada medida de la señal se mide con un ADC (Convertidor de Analógico a Digital - *Analogue to Digital Converter*) y con el DMQT.

# 2.5 NESTOR

## 2.5.1 La propuesta

NESTOR (Neutrino Extended Submarine Telescope with Oceanographic Research) [71, 72] fue una colaboración que pretendía la instalación de un telescopio de neutrinos en el mar Egeo. Las principales localizaciones propuestas se pueden ver en la Figura 2.9. La más idónea se encuentra a una profundidad de 4000 m, a 40 km de la ciudad de Pylos, en el sur de Grecia y es una de las localizaciones actuales propuestas para KM3NeT. NESTOR se fusionó junto con las colaboraciones NEMO y ANTARES para formar la colaboración KM3NeT.



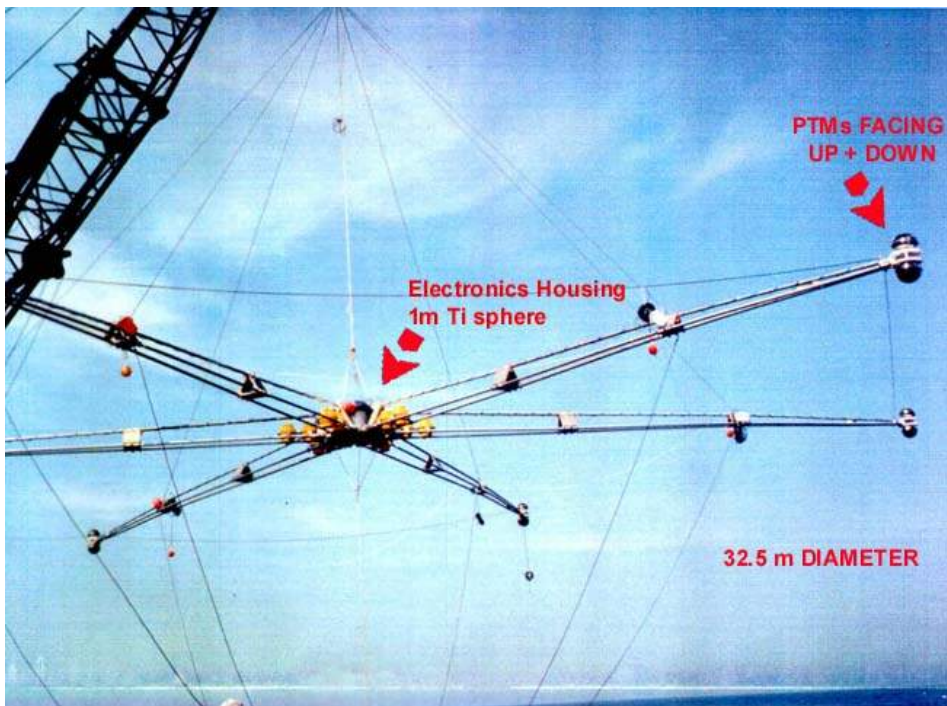
**Fig. 2.9:** Plano de situación del emplazamiento de NESTOR, actualmente es uno de los propuestos para KM3NeT [71].



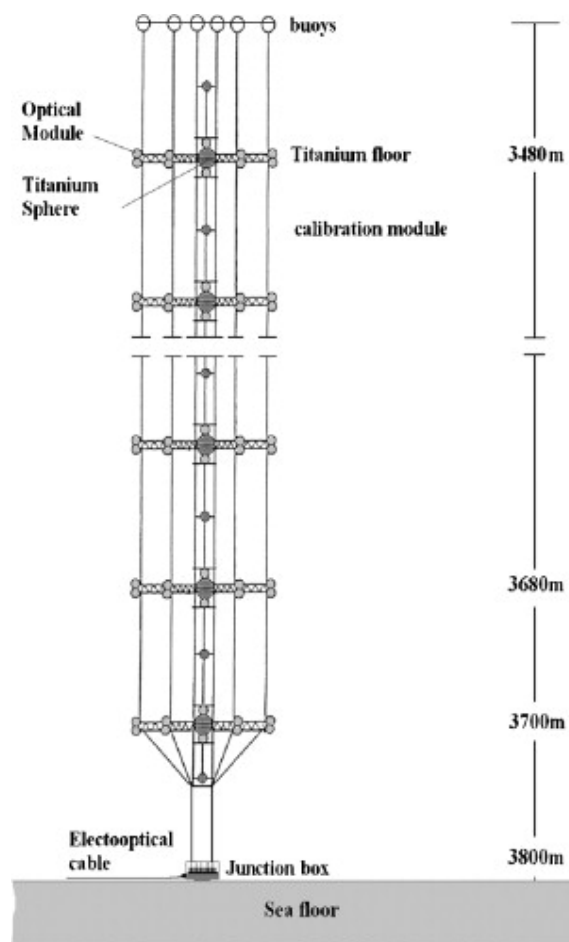
La estructura básica de detección del telescopio se planteó como una torre hexagonal de doce pisos y 32 m de diámetro con una separación entre pisos de 20 m. Esta torre está equipada con PMTs de 15 pulgadas situados en las esquinas de los pisos hexagonales, totalizando 168 PMTs en total [73]. Cada PMT se encuentra alojado dentro de una esfera de cristal resistente a la presión y de un diámetro de 17 pulgadas.

El primer piso o estrella, con doce módulos, de una de las torres de NESTOR se instaló en marzo de 2013 junto con el sistema de electrónica a una profundidad de 4000 m. La conexión con la estación de control se realizó con un cable electro-óptico de 28 km de longitud, el cual proporciona tanto el voltaje de alimentación como las fibras ópticas necesarias para la transmisión de datos y comandos.

El cable electro-óptico finalizaba en una JB (Caja de Conexiones - *Junction Box*), la cual formaba parte del sistema de anclaje piramidal del detector, que como su nombre indica, anclaba el telescopio de neutrinos al suelo submarino. El cable de cada uno de los contenedores de electrónica de cada piso o estrella se conectaba a esta JB. Los PMTs se colocaban en parejas, uno encima del otro, el superior apuntando hacia arriba y el inferior apuntando hacia abajo. La Figura 2.10 muestra un piso completo de NESTOR durante el proceso de instalación mientras que la Figura 2.11 muestra un esquema de la torre de NESTOR.



**Fig. 2.10:** Piso de NESTOR, nótese la forma en estrella o hexágono [73].



**Fig. 2.11:** Arquitectura de la torre de NESTOR [71].

## 2.5.2 Electrónica de adquisición de NESTOR

La electrónica de adquisición de NESTOR tiene la capacidad de realizar coincidencias por piso por lo que puede filtrar a este nivel los datos a enviar a la estación de la costa. Cada piso o estrella tiene su propia electrónica de adquisición que consta de cuatro componentes *hardware*.

### 2.5.2.1 Tarjeta de adquisición de piso

El primero de ellos es una tarjeta de *readout* y control dentro de una esfera de titanio. Esta tarjeta incluye el subsistema de adquisición de los PMTs, el subsistema de *trigger* por lógica de mayorías, la captura de la forma de onda

y su digitalización, la formación de eventos y su transmisión a la estación de la costa, más un sistema para la reconfiguración de la FPGA a través de la fibra óptica.

También incluye un ASIC denominado ATWD (Digitalizador de Forma de Onda del Transitorio Analógico - *Analog Transient Waveform Digitizer*). Cada ATWD tiene cuatro canales y contiene 128 ADCs Wilkinson de rampa común y 10 bits, que digitalizan a la vez 120 muestras de un canal seleccionado. El sampleo se genera por una línea de retraso activo sin que se utilicen relojes para la captura de la forma de onda. La frecuencia de muestreo está determinada por una señal de corriente externa y se puede variar de 200 MHz a 2 GHz. La velocidad de muestreo es de 282 MHz (un periodo de muestreo de 3.54 ns) y permite tanto capturar las señales de los PMTs como reconocer los pulsos superpuestos. Para esta frecuencia de muestreo el rango dinámico de cada canal de ATWD es de 453 ns. Un *trigger* de piso ocurre cuando se satisface un requisito de coincidencia local en el piso. El tiempo de un *trigger* de piso viene definido por el flanco de subida de la señal de lógica de mayorías, que inicia la captura de la forma de onda por parte del ATWD. Este *time stamp* se utiliza también en la costa para construir un evento global, en el que se combina la información de varios pisos. Además de la adquisición de los PMTs mediante los ATWDs, la tarjeta proporciona varias opciones de calibración y monitorización. Por ejemplo, uno de los canales de cada ATWD se ha reservado para poder realizar una calibración al digitalizar una señal de reloj de 40 MHz.

### 2.5.2.2 Tarjeta de *slow control* y otros elementos

Además de la tarjeta anterior en la esfera de titanio, hay una tarjeta de *Slow Control* que se encuentra conectada a la tarjeta del piso con una interfaz digital. Esta se encarga de controlar y monitorizar el HV (Alto Voltaje - *High Voltage*) de los PMTs, controla los LEDs de calibración y monitoriza la condiciones medioambientales.

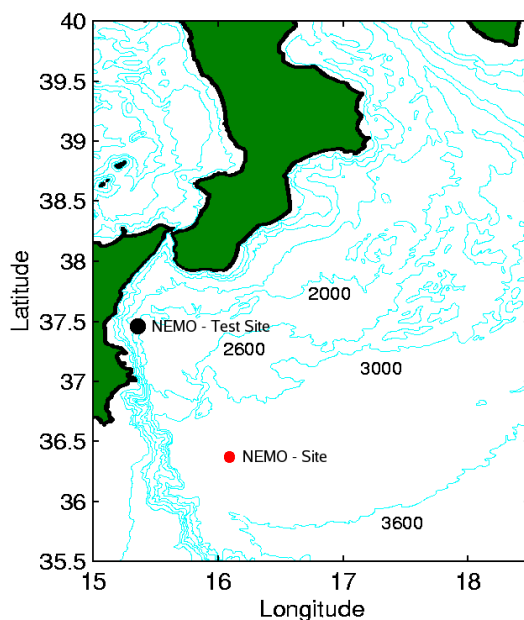
Otro de los elementos *hardware* fundamentales es el *link* bidireccional óptico entre cada piso y la estación de la costa. En la estación de la costa hay una tarjeta de control, que se encarga de distribuir un reloj global de 40 MHz hacia las tarjetas de adquisición de piso, recibe los datos y los transmite al

segundo nivel de *trigger* del sistema. También es capaz de reprogramar las FPGAs de cada piso.

## 2.6 NEMO

En 1998 se formó la colaboración NEMO (NEutrino Mediterranean Observatory) con el objetivo [74] de realizar las tareas de investigación y desarrollo para la construcción de un telescopio de neutrinos en el mar Mediterráneo, cerca de la costa de Sicilia como se observa en la Figura 2.12.

Las primeras propuestas proponían instalar un total de 81 torres espaciadas entre sí unos 150-200 m dentro de una matriz cuadrada. Cada una de las torres propuestas tenía una longitud total de 700 m y un total de 18 pisos, cada uno de ellos con cuatro OMs. Una vista esquemática de estas torres se puede ver en la Figura 2.13. Los OMs se situaban, por parejas, en los extremos de una barra de unos 12 m de longitud.



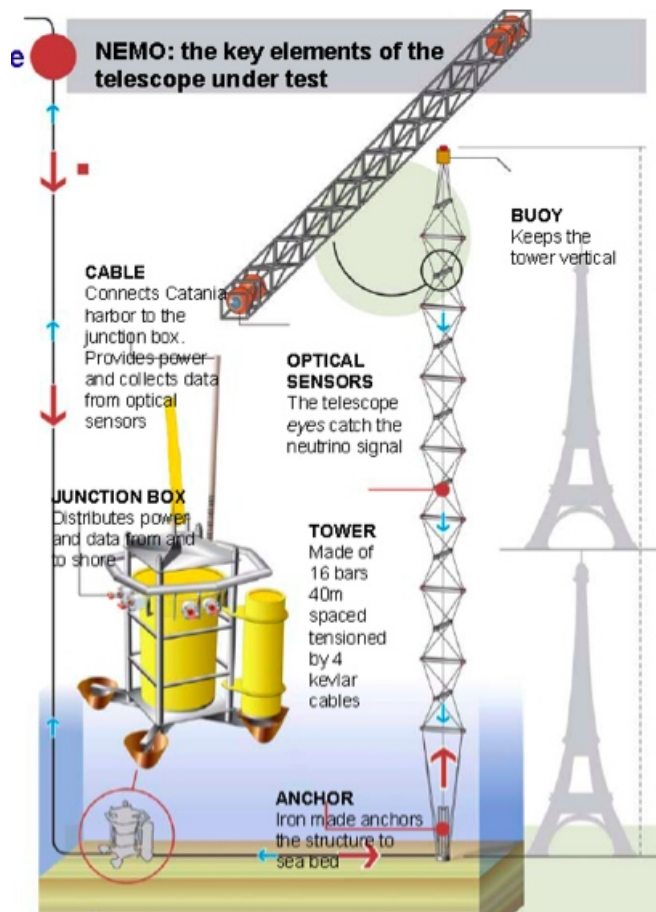
**Fig. 2.12:** Emplazamiento de NEMO, cercano a las costas de Sicilia [74].

En el invierno de 2006 se instaló el primer prototipo de torre que constaba de cuatro pisos a unos 25 km del puerto de Catania y a 2000 m de profundidad [75].

Posteriormente, en marzo de 2013 se instaló la primera torre de la fase II de NEMO a una profundidad de 3500 m en el fondo abisal del mar de Sicilia, que estuvo tomando datos hasta agosto de 2014 [76].

### 2.6.1 Electrónica de adquisición de NEMO

La electrónica de *frontend* se encuentra localizada dentro de la esfera de cristal del OM. La tarjeta de adquisición digitaliza la señal analógica producida por el PMT, transmitiendo posteriormente esta información hacia la costa.



**Fig. 2.13:** Torre de NEMO.

Previamente a la discretización, que pretende adquirir la forma de onda del pulso analógico del PMT, se realiza un pre-acondicionamiento analógico [77].

Para ello, se utiliza una frecuencia de muestreo de 200 MHz, la cual se considera suficiente para retener la mayor parte de la información relevante mientras que se mantienen unas buenas características de consumo de potencia. La frecuencia de 200 MHz se obtiene operando dos ADCs de 100 MHz y ocho *bits* trabajando en oposición. De esta manera es posible obtener los 200 MHz deseados mientras que el consumo es menor que si se emplease un solo ADC de 200 MHz.

El teorema de Nyquist establece que se debe muestrear con una frecuencia al menos dos veces mayor que la frecuencia de la señal a adquirir. Esto significa que con 200 MHz de frecuencia de adquisición solo se podrán adquirir señales de 100 MHz, por lo tanto la señal del PMT se trata con un filtro *aliasing* que alarga la señal del PMT para un solo fotoelectrón a 50 ns. Además, para adaptar el rango dinámico de la señal del PMT de 0 a 5 V al rango de la entrada del ADC (1024 mV) la señal se comprime por un circuito no lineal que aplica una ley cuasi-logarítmica. La resolución equivalente obtenida es de alrededor de 13 *bits* con un error relativo constante. El sistema incluye un auto calibrador, compuesto por un DAC (Convertidor de Digital a Analógico - *Digital to Analogue Converter*) de doce *bits* que puede generar un voltaje que se inyecta en la entrada del circuito compresor. La medida dada por los ADCs se compara por la generada por el DAC, pudiéndose así ajustar los parámetros de lectura.



## 2.7 AMANDA

AMANDA [78] (Antartic Muon And Neutrino Detector Array) es un telescopio de neutrinos de alta energía construido en la Antártida a finales de la década de los 90. El número de líneas instaladas fue de 13 con un total de 418 OMs.

AMANDA utiliza el hielo antártico tanto como blanco para los neutrinos como medio de difusión de la luz Cherenkov. El detector consta de varias líneas de OMs congelados en la capa de hielo de 3 km de la Antártida. Un OM consiste en un fotomultiplicador dentro de una esfera de cristal, que incluye además la electrónica de adquisición necesaria. Las líneas se instalan en agujeros perforados con agua caliente inyectada a presión. La columna de agua del agujero se vuelve a congelar en las siguientes 40 horas, fijando la línea recién instalada en su posición final. Cada OM es alimentado por un cable que proporciona el HV y que recoge la señal del ánodo del PMT. La Figura 2.14 muestra la arquitectura principal de AMANDA.

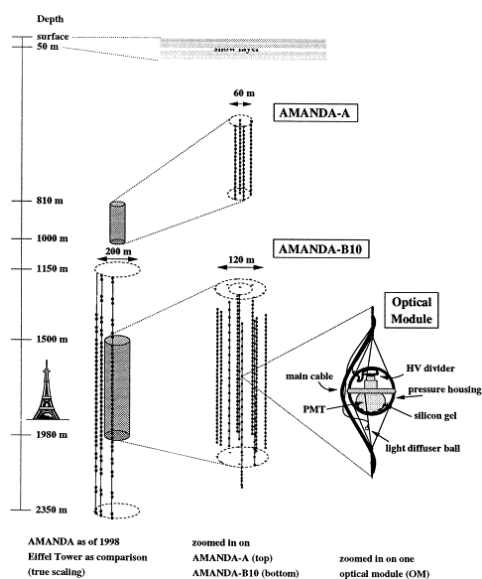
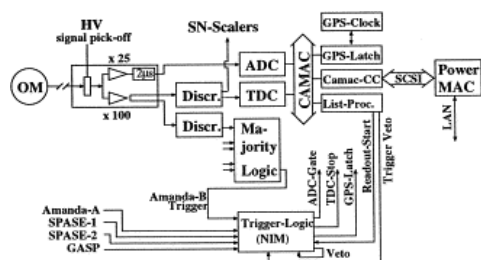


Fig. 2.14: Estructura de AMANDA [78].



**Fig. 2.15:** Esquema de la electrónica de adquisición de AMANDA [78].

## 2.7.1 Electrónica de adquisición de AMANDA

Cada PMT puede proporcionar una serie de pulsos, los cuales se pueden discriminar para saber si se encuentran separados entre sí más de unos cientos de nanosegundos. Los datos almacenados consisten en los flancos de subida y de bajada de los pulsos. El tiempo sobre el nivel de *threshold* da una medida de la amplitud de los pulsos individuales. Otra medida de la amplitud se obtiene por un ADC, que almacena el valor de pico de los *hits* subsecuentes a un evento en un PMT. De hecho, esta información consiste en los flancos de subida y bajada de los últimos ocho pulsos, y de la mayor amplitud de aquellos que se han producido en una ventana de  $4 \mu\text{s}$ . También se almacena el tiempo GPS (Sistema de Posicionamiento Global - *Global Positioning System*) en el cual ha ocurrido el evento. La Figura 2.15 muestra el esquema de la electrónica de AMANDA.

La señal de cada cable alimenta un módulo que consiste en un filtro de paso alto que recoge el pulso. Después de ser filtrado, el pulso se envía a dos amplificadores, uno con una ganancia de 100 y el otro de 25. La salida del segundo amplificador se conecta a un bloque que retrasa dicha señal  $2 \mu\text{s}$ . La señal retrasada se manda a un ADC de muestreo. El otro pulso se divide y se envía a unos discriminadores con los límites fijados a 100mV, valor que corresponde a alrededor de 0.3 - 0.4 fotoelectrones para el HV dado. Una de las señales ECL resultante se introduce en un TDC mientras que la otra se envía a un disparador de mayorías. El TDC almacena los últimos 16 flancos que ocurren en una ventana temporal de  $32 \mu\text{s}$ .

La lógica de mayorías requiere ocho o más eventos del PMT en una ventana temporal de  $2 \mu\text{s}$ . El *trigger* producido por la lógica de mayorías se envía a una lógica de *trigger* NIM. El ratio total de *trigger* en 1996 fue de 2 Hz de

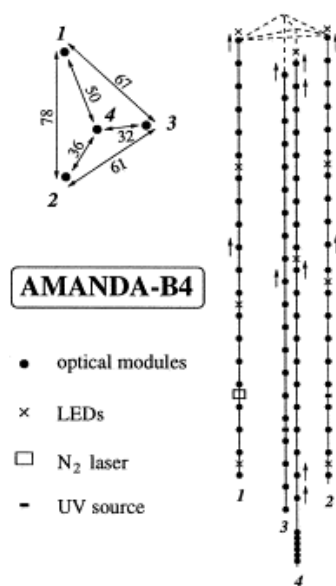
media. Las diferencias en la longitud del cable no se compensan antes del *trigger*. Por lo tanto, la ventana de *trigger* real es de alrededor de 300 ns para las partículas relativistas ascendentes y de aproximadamente 4  $\mu$ s para las descendentes. Como resultado, las partículas descendentes son suprimidas en comparación con las ascendentes.

En el momento del *trigger* se forma una ventana de 4  $\mu$ s en el ADC, se envía una señal de *stop* a los TDCs y se envía una señal de *readout* a un procesador. En ese momento, un veto que dura varios microsegundos inhibe cualquier señal de *trigger* posterior. Un sistema separado monitoriza los ratios de los PMTs individuales y busca excesos que duren varios segundos. Estos excesos se producirían por interacciones de múltiples neutrinos de baja energía cercanos a cada PMT debidos a una explosión de SN. El sistema DAQ (Adquisición de Datos - *Data AcQuisition*) ejecutaba en un ordenador, que comunicaba a través de un bus SCSI (Pequeña Interfaz del Sistema de Cómputo - *Small Computer System Interface*) con un controlador CAMAC. De la distribución de diferencias de tiempos entre eventos, se estimaba que el tiempo muerto del DAQ era del 12 %.

## 2.7.2 Instrumentación de calibración en AMANDA

AMANDA, como cualquier otro detector de neutrinos, necesita tener un buen conocimiento de la propiedades ópticas del medio en el que está instalado, así como obtener una buena calibración temporal del telescopio. Con este fin, se utilizan diferentes fuentes de luz que se han instalado a diferentes profundidades (ver Figura 2.16). Estas son:

- El sistema de calibración de láser YAG (Granate de Itrio y Aluminio - *Yttrium Aluminium Garnet*): Este sistema utiliza fibras ópticas con difusores localizados en cada PMT. El rango de longitudes de onda es mayor a 450 nm, la resolución temporal de alrededor de 15 ns a 530 nm y la intensidad máxima emitida por los difusores es de  $10^8$  fotones. Además de utilizarse para la caracterización del hielo, el láser se utiliza para la calibración temporal del PMT más cercano al difusor y para la calibración de posición.
- Otro de los sistemas utilizados es un láser de nitrógeno situado a 1850 m de profundidad, con una longitud de onda de 337 nm, una



**Fig. 2.16:** Posición de la instrumentación de calibración de AMANDA [78].

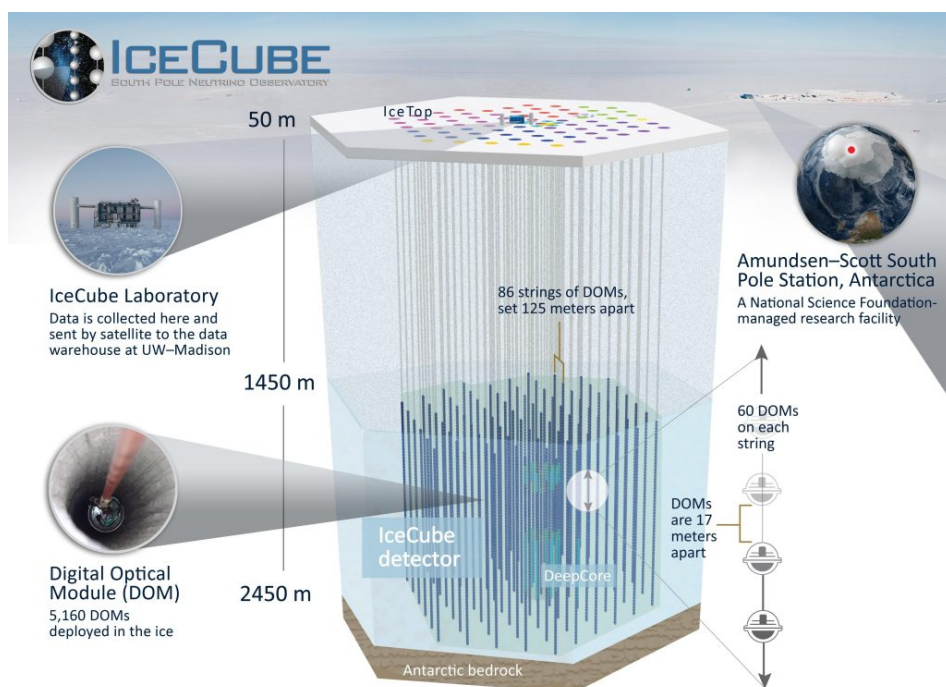
duración del pulso de 1 ns y con una intensidad máxima de pulso de  $10^{10}$  fotones.

- Tres lámparas halógenas de continua, una de amplio espectro y dos con filtros para 350 nm y 380 nm. La intensidad máxima para las lámparas filtradas es de  $10^{14}$  fotones y de  $10^{18}$  fotones para la lámpara sin filtros.
- LED *beacons*, operados con pulsos de 500 Hz, con una duración de siete ns,  $10^{16}$  fotones por pulso. Si se operan en continua entonces la intensidad máxima es de  $10^{14}$  fotones por segundo. La longitud de onda es de 450 nm si bien existen algunos LED beacons que se filtran a 390 nm. En estos casos la intensidad máxima es menor.

## 2.8 IceCube

### 2.8.1 Introducción

IceCube [79, 80] es la continuación de AMANDA, habiéndose convertido en el primer telescopio de neutrinos en detectar neutrinos extragalácticos [81].



**Fig. 2.17:** Esquema principal de configuración de IceCube.

En total IceCube consta de 5160 DOMs (Modulo Óptico Digital - *Digital Optical Module*) con los que se instrumenta aproximadamente un kilómetro cúbico de hielo antártico. Los DOMs se distribuyen en 86 líneas verticales, cada una conteniendo 60 DOMs que están espaciados entre sí unos 17 m, instalándose en agujeros de 2500 m de profundidad que se perforan con agua caliente. La Figura 2.17 muestra un esquema de IceCube.

## 2.8.2 DOM

El DOM de IceCube [79] tiene unos requerimientos de diseño muy exigentes debido a las condiciones en las que tiene que operar. Estos tienen que almacenar los tiempos de llegada de la mayoría de los foto-electrones detectados por los PMTs, con una resolución temporal mejor de 5 ns. Debido al alto coste del combustible del generador, que debe ser transportado en avión, cada DOM tiene un consumo menor a los 5 W. Igualmente, al no poderse acceder a los DOMs una vez instalados, los requisitos de fiabilidad establecen que el 90 % de los DOMs debe de continuar operativo a los 15 años. Cada DOM consiste en un PMT de diez pulgadas de diámetro junto con la electrónica de adquisición asociada. La electrónica del PMT incluye una fuente de alimentación de alto voltaje *Cockroft-Walton* y un divisor resistivo. El DOM también incluye 13 LEDs que se utilizan para calibración. La esfera de cristal del DOM es de borosilicato y es capaz de soportar presiones de 70 MPa. Se utiliza un gel óptico para acoplar el PMT a la esfera de cristal. La esfera se rellena con nitrógeno a una presión de 0.5 atm.

## 2.8.3 Electrónica de adquisición de IceCube

El elemento principal del sistema de *readout* de IceCube lo forman dos sistemas de digitalización de forma de onda, el ATWD, visto ya en la Sección 2.5.2 y el fADC (Convertidor Analógico a Digital rápido - *fast Analog to Digital Converter*). Un ciclo de digitalización se origina por un *trigger* por discriminador, correspondiendo el voltaje del límite del disparador a un cuarto de fotoelectrón. Cuando el discriminador dispara, la FPGA inicia ambos digitalizadores síncronamente en el siguiente ciclo de reloj. Se utiliza una línea de retraso de 70 ns antes del ATWD. De este modo, la señal del PMT se sitúa muy cerca del inicio del ciclo de digitalización. Para maximizar la fiabilidad, esta línea de retraso se implementa en una tarjeta electrónica independiente mediante una pista serpenteante. Este sistema limita el ancho de banda de la línea de retraso a alrededor de 100 MHz.

Cada DOM contiene dos chips de ATWD, que trabajan en oposición, cuando uno se encuentra digitalizando el otro se encuentra disponible, así es posible reducir considerablemente el tiempo muerto de adquisición. El fADC

utiliza un *chip* comercial de 10-bits a 40 Msamples/s que funciona de forma continua. Previo al fADC se encuentra un amplificador conformador de tres etapas que alarga el ancho de la señal del PMT hasta los 180 ns. Como el pulso cubre eventos múltiples, es posible determinar el tiempo de llegada de los fotones con una precisión mejor de 5 ns. Cuando ocurre un *trigger* el sistema almacena 256 muestras del fADC cubriendo 6.4  $\mu$ s. El fADC tiene un rango dinámico limitado y por eso se desborda incluso con señales de tamaño mediano. Sin embargo, para señales más pequeñas puede dar información relevante.

Los datos que se generan con un *trigger* consisten en al menos una forma de onda ATWD y otra fADC, más un *time-stamp* y las señales de coincidencia de los DOMs adyacentes. Los datos de la forma de onda del ATWD se guardan siempre, mientras que los del fADC solo se almacenan si el *bin* de la forma de onda es mayor de 768 cuentas de ADC. Para ganar ancho de banda las forma de ondas se comprimen utilizando compresión *delta*.

El *time-stamp* viene dado por el reloj del sistema de 40 MHz, mostrando cuando el DOM lanzó el *trigger* del evento. Ya que este instante determina el tiempo de llegada de los fotones, la precisión es muy importante y por ello se utilizan osciladores de precisión. El sistema se controla mediante una FPGA Excalibur EPXA-4 de Altera que incorpora un ARM9 (Máquina RISC Avanzada - *Advanced RISC Machine*) *hardcore*. La FPGA controla el *trigger* y el digitalizador, encola los datos y realiza la mayor parte del ensamblaje de los paquetes, mientras que la CPU realiza las tareas de más alto nivel incluyendo las tareas de calibración. El *software* y el *firmware* se pueden reprogramar *in-situ*, y el sistema garantiza que la reprogramación se realice de una forma segura. Para ello, la FPGA utiliza dos fuentes diferentes. En el arranque inicial la FPGA utiliza las fuentes almacenadas en una memoria permanente de 8-Mbits que no puede ser modificada. Estas fuentes proporcionan las funcionalidades básicas tales como la comunicación. Sin embargo, para permitir la reconfigurabilidad del sistema, es posible saltar a otras fuentes almacenadas en una memoria *flash* que puede ser modificada desde la superficie. La Figura 2.18 muestra la electrónica de *readout* instalada en un DOM de IceCube.





**Fig. 2.18:** Electrónica de *readout* del DOM de IceCube.



## 2.8.4 Fiabilidad

Uno de los puntos críticos del *hardware* de IceCube es la fiabilidad. Una vez instalado es imposible reparar un DOM, por lo que se utilizaron componentes de alta fiabilidad a la vez que se eligieron con condiciones de trabajo nominales mucho mayores que las que finalmente se soportan una vez instalados (gran *derating*). Los prototipos de las tarjetas se sometieron a procedimientos HALT (Ensayos de Vida Altamente Acelerada - *Highly Accelerated Life Tests*) incluyendo altas y bajas temperaturas, cambios de temperatura rápidos y vibración. También se realizaron medidas con cámaras térmicas para la identificación de puntos calientes en las tarjetas. Toda la producción de tarjetas se sometió al protocolo HASS (Ensayos de Filtrado con Stress Acelerado - *Highly Accelerated Stress Screen*) tests. Los tests se completaron con el *burn-in* de todos los DOMs durante un mes, incluyendo temperaturas que variaron desde temperatura ambiente a  $-55^{\circ}\text{C}$ .



# ANTARES

# 3

” *I guess my favorite is Antares .... But it's in its last stages, about to collapse.*

— Isaac Asimov

## 3.1 Introducción

ANTARES (Astronomy with a Neutrino Telescope in Abyss environment RESearch) [82] ha sido el primer telescopio de neutrinos submarino en ser instalado y operar en el mar Mediterráneo. Su instalación se inició en 2004 y se completó en mayo de 2008.

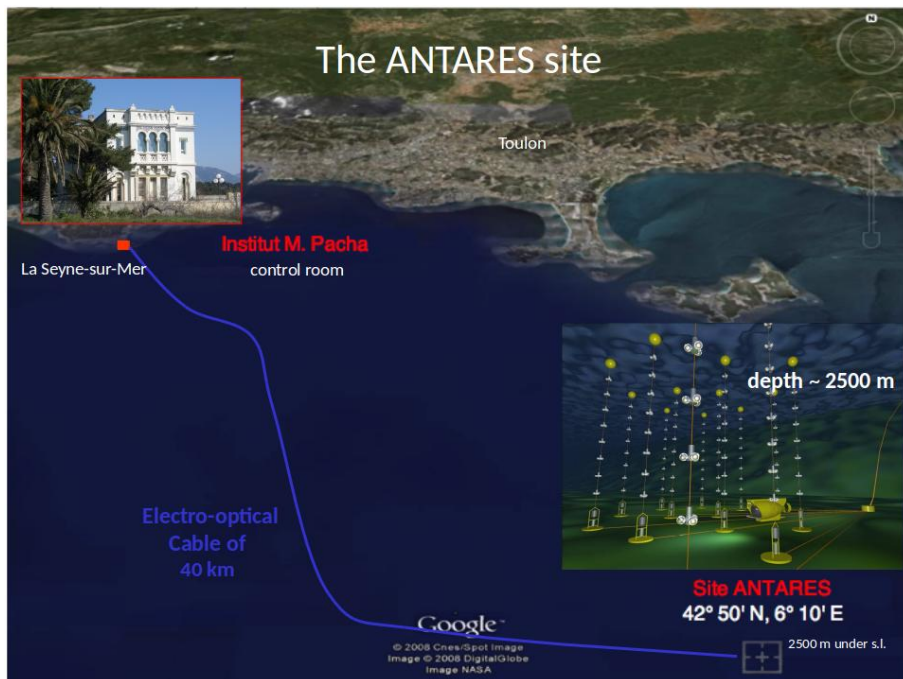
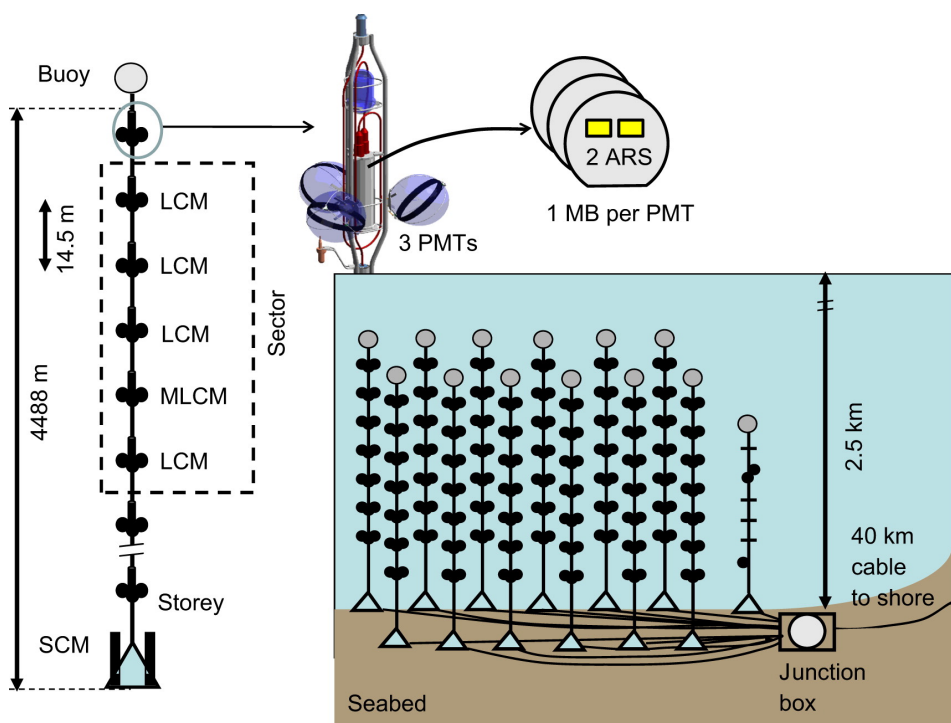


Fig. 3.1: Localización e ilustración artística de ANTARES.

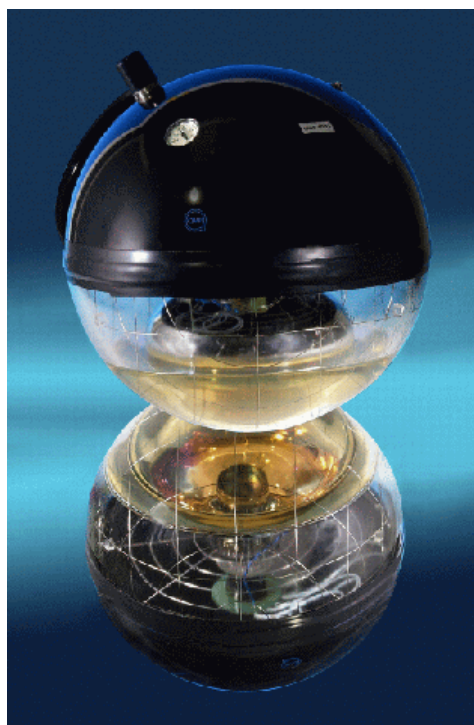


**Fig. 3.2:** Vista esquemática del telescopio de neutrinos ANTARES.

El telescopio consta de 12 líneas, con 25 pisos por línea y 3 OMs (Módulo Óptico - *Optical Module*) por piso. El total de módulos ópticos instalados en ANTARES es de 885 ya que en la última línea tan solo se montaron 20 pisos (los pisos superiores están equipados con un prototipo de detectores acústicos [83]). Se encuentra (ver Figura 3.1) situado a 40 km de la costa sur de Francia, a la altura de Tolón ( $42^{\circ}48' \text{ N } 6^{\circ}10' \text{ E}$ ). La profundidad a la que se encuentra es de 2500 m. La Figura 3.2 muestra una vista esquemática del detector.

## 3.2 Líneas

Las líneas son estructuras flexibles y están conectadas por segmentos de un cable que proporciona la sujeción mecánica necesaria para asegurar su integridad, la distribución de la alimentación y la comunicación de datos a



**Fig. 3.3:** OM de ANTARES. Se puede observar el PMT (Fotomultiplicador - *Photo-Multiplier Tube*) fijado a la esfera mediante un gel transparente así como el penetrador a través del cual el OM comunica con el exterior

través de fibras ópticas. Las líneas se encuentran ancladas al fondo marino y se mantienen verticales mediante una boya colocada en la parte superior. Cada línea se conecta mediante un cable a una JB (Caja de Conexiones - *Junction Box*), la cual se conecta con la costa a través de un cable electro-óptico de larga distancia (de aproximadamente 40 km de longitud). Las conexiones de los cables se llevan a cabo mediante submarinos ROV (Vehículo Submarino Teledirigido - *Remotely Operated underwater Vehicle*). El detector, además de las 12 líneas de adquisición, incluye una línea de instrumentación de menores dimensiones para calibración y monitorización medioambiental.

### 3.2.1 Módulo óptico

Cada OM tiene un PMT de 10 pulgadas de diámetro y se encuentra inclinado  $45^\circ$  hacia el fondo marino con el objeto de priorizar la detección de muones



**Fig. 3.4:** Imagen de uno de los pisos de ANTARES con tres OMs y un LCM.

ascendentes. La Figura 3.3 muestra una imagen de un OM de ANTARES. Los PMTs se encuentran dentro de una esfera de cristal resistente a la presión. Las líneas, que se encuentran separadas entre sí una distancia de entre 60 y 70 m, tienen una longitud total de 450 m con una separación de 14.5 m entre pisos. El piso inferior se encuentra a 100 m sobre el lecho marino.

### 3.2.2 Pisos

Cada piso, además de los 3 OMs, incluye un módulo electrónico y, en algunos pisos específicos, instrumentos de calibración o de monitorización. Se utiliza una estructura de titanio que fija tanto los OMs como el módulo de electrónica. La Figura 3.4 muestra un piso de ANTARES mientras que la Figura 3.5 muestra una línea de ANTARES lista para ser instalada.



**Fig. 3.5:** Línea de ANTARES lista para ser instalada.

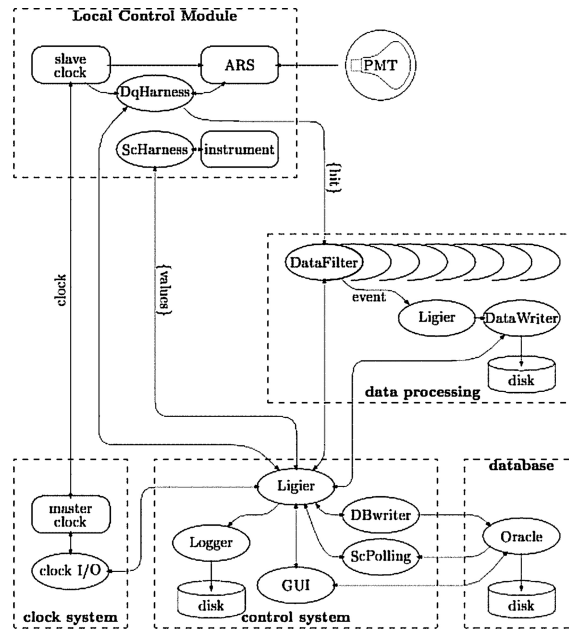
### 3.2.3 Módulo de control local

El módulo de electrónica, llamado LCM (Módulo de Control Local - *Local Control Module*), contiene toda la electrónica necesaria para la adquisición y control de todos los instrumentos del piso y de la comunicación. Los pulsos eléctricos producidos en los PMTs son digitalizados por la electrónica de *frontend* [84], procesados por el sistema de *readout* [85] y enviados a la costa por el cable electro-óptico que conecta el detector con la estación de control en La Seyne-sur-Mer. La Figura 3.6 muestra un esquema de la arquitectura del DAQ (Adquisición de Datos - *Data Acquisition*) de ANTARES.

### 3.2.4 Sectores

Cada línea se divide en cinco unidades funcionales, llamadas sectores, cada uno de ellos con cinco pisos. El detector se ha diseñado para permitir una comunicación independiente con cada uno de los sectores. En cada sector hay un módulo electrónico, llamado MLCM (Módulo de Control Local Maestro - *Master Local Control Module*), que actúa como acceso para las comunicaciones entre su sector y la costa. Un último contenedor se localiza





**Fig. 3.6:** Esquema del DAQ de ANTARES. La adquisición se realiza en el LCM enviándose los datos ópticos adquiridos al Data Filter, donde una vez tratados se almacenan en disco. El sistema de reloj proporciona la señal de sincronización a la electrónica de adquisición. El sistema de control se encarga de dirigir la adquisición del detector, gestionando los demás sistemas que forman el DAQ de ANTARES [82].

al pie de la línea donde proporciona la interfaz entre la línea y el resto del telescopio. Su nombre es SCM (Módulo de Control de Línea - *String Control Module*).

### 3.3 Adquisición de datos

Desde el punto de vista de la adquisición de datos y del *slow control*, el detector está concebido como una red Ethernet de 315 nodos, uno por cada nodo electrónico.

Las comunicaciones utilizan la técnica DWDM (Multiplexado por División de Longitud de Onda Densa - *Dense Wavelength Division Multiplexing*). El SCM y cada MLCM de una línea están equipados para comunicaciones



ópticas utilizando canales de longitudes de ondas separadas 400 GHz. Las señales que vienen de los diferentes sectores de la línea se multiplexan en una única fibra óptica dentro del SCM. Por otra parte, las señales que vienen de la costa se multiplexan en el SCM y se envían al destino apropiado.

Los MLCMs están equipados con un *switch* Ethernet y con *transceivers* electro-ópticos que les permiten comunicarse con los LCMs del sector mediante una configuración de red en estrella. Esta arquitectura permite implementar una tasa de transferencia de datos elevada con un número limitado de fibras ópticas. De este modo, es posible transferir a la costa toda la información recogida por el detector con un mínimo de filtrado al nivel de los OMs o las líneas.

La señal de reloj se genera en la estación de control de la costa a partir de un receptor de GPS que proporciona una referencia de tiempo absoluta, la cual se transmite a la electrónica del detector a través de una fibra óptica específica.

## 3.4 La electrónica de *frontend*

La salida de cada PMT va a una tarjeta electrónica que contiene dos ARSs (Muestreador Analógico en Anillo - *Analogue Ring Sampler*) que funcionan en una configuración de *token ring* y que se encargan de procesar y digitalizar las señales analógicas proporcionadas por los PMTs. Cada LCM contiene tres tarjetas para tratar las señales proporcionadas por cada uno de los 3 OMs de cada piso. Además, en algunos LCMs hay una cuarta tarjeta para procesar el PMT que monitoriza el LED *beacon* utilizado para la calibración óptica (Sección 5.1).

Se utiliza un transformador para acoplar las impedancias de la señal del PMT, tal y como se muestra en la Figura 3.7. El PMT se puede aproximar a una fuente de corriente, de forma que la mejor forma de transmitir la señal es en forma de corriente diferencial entre el ánodo y el último dínodo. La corriente se convierte en voltaje cuando pasa a través de la impedancia de entrada del ARS, cuyo valor es 25  $\Omega$ . La impedancia del cable es de 100  $\Omega$ ,

así que es necesario un transformador para acoplar las impedancias y evitar reflejos y distorsiones de la señal.

Los datos digitalizados por el ARS pasan a la tarjeta de DAQ, que se encarga de almacenar, multiplexar y transmitir los datos adquiridos a la estación de control de la costa. Todas las transmisiones intermedias se realizan en DCL (Lógica de Corriente Continua - *Direct Current Logic*), que es una señal lógica de corriente con un nivel de 50  $\mu\text{A}$ . Al ser tan baja la corriente solo se pueden generar perturbaciones bajas de voltaje y por lo tanto se minimiza el *cross-talk* entre las señales.

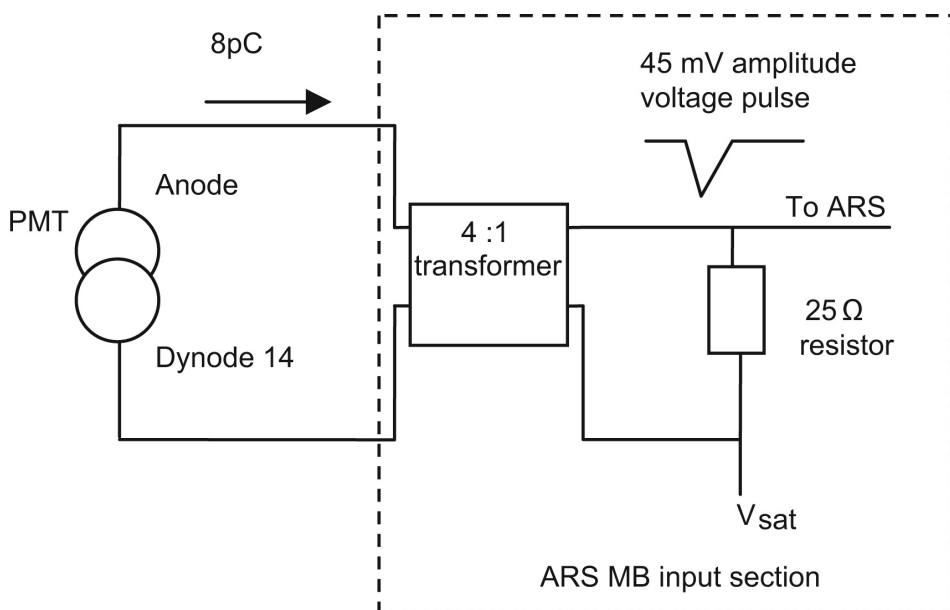
### 3.4.1 El ASIC ARS

El ARS es un ASIC que utiliza la tecnología AMS CMOS de 0.8  $\mu\text{m}$ , con un total de 68000 transistores. Se alimenta por un solo *rail* de 5 V. El ARS proporciona dos modos de funcionamiento, el primero detecta señales cuya forma de onda es compatible por las generadas por un solo fotoelectrón, modo SPE (Un Solo Fotoelectrón - *Single PhotoElectron*) y el segundo adquiere la totalidad de la señal. Este último modo se llama modo WF (Forma de Onda - *WaveForm*). En modo SPE el ARS puede medir la carga y el tiempo de llegada del evento, mientras que en modo WF puede muestrear la señal a alta frecuencia.

El muestreo a alta frecuencia está basado en células de seguimiento y mantenimiento. El muestreador está equipado con cuatro canales de entrada que se adquieren de forma síncrona. Las señales muestreadas son la señal del ánodo del PMT y la del dínodo 12, que proporciona una señal unas 15 veces inferior a la del ánodo, con lo cual es posible analizar señales con mayor amplitud. Del mismo modo, en otro de los canales se muestrea una señal que es cinco veces menor a la del ánodo. El último canal se utiliza para muestrear el reloj de referencia de 20 MHz necesario como base de tiempos para la sincronización.

El ánodo del PMT se conecta también a un comparador de carga y a un PSD (Discriminador de Forma de Pulso - *Pulse Shape Discriminator*). El PSD contiene dos comparadores adicionales.

El ARS puede funcionar en modo SPE, con lo cual obtiene mayor tasa de adquisición; en modo WF, en el cual obtiene la reconstrucción completa de



**Fig. 3.7:** Acople de impedancias entre el OM y el ARS [84].

la forma del pulso pero con una tasa de adquisición de eventos menor, o en un modo en el que el PSD decide, dependiendo de la forma del pulso, si el ARS trabaja en modo SPE o en modo WF.

La operación normal de ANTARES se produce típicamente en el modo SPE ya que este minimiza el consumo y los datos a transmitir mientras que aumenta la tasa de adquisición de eventos, reservándose el modo WF únicamente para los procesos de calibración.

### 3.4.2 Descripción funcional del ARS

El ARS es un ASIC que implementa un circuito asíncrono que se excita por los pulsos que llegan de un fotomultiplicador. El circuito contiene 24 DACs, dos ADCs, un integrado seguido de un AVD (Convertidor de Analógico a Voltaje - *Analogue to Voltage Converter*), un TVC (Convertidor de Tiempo a Voltaje - *Time to Voltage Converter*) y un muestreador analógico de 4 canales con una profundidad de 128 células, el cual se puede configurar para adquirir hasta una frecuencia máxima de 1.1 GHz. El ARS cuenta también con 239 bits de control que permiten configurar el modo de funcionamiento del ARS. La

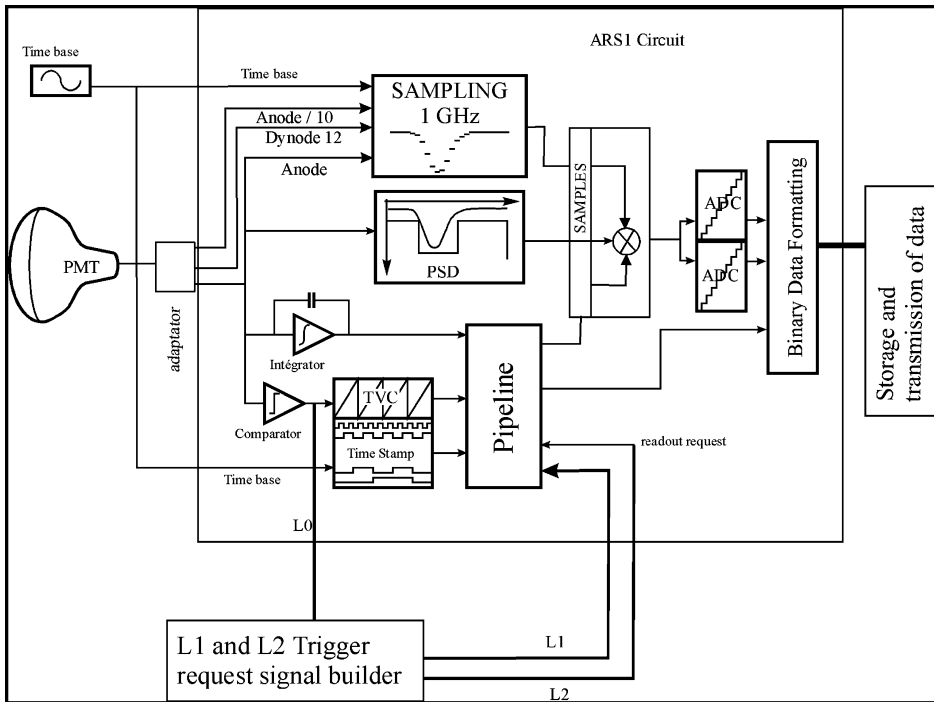
Figura 3.8 muestra la arquitectura del ARS y la Figura 3.11) muestra una tarjeta de adquisición de ANTARES con los ARSs instalados.

El modo de funcionamiento estándar empieza cuando una señal proveniente del PMT sobrepasa el límite del comparador de nivel L0. En este momento se envía una señal de *trigger* a la tarjeta de DAQ. También se puede pedir que llegue una señal externa de *trigger* (L1) que se habría activado por coincidencias entre diferentes OMs.

Al mismo tiempo, si el modo PSD está activado, el bloque PSD analiza la forma de la señal del PMT y la compara con una forma de onda predeterminada. En paralelo, el pulso es muestreado e integrado. El tiempo de llegada es asignado a un TS (Marca de Tiempo - *Time Stamp*), basado en el reloj de sincronización de 20 MHz para una sincronización *gruesa* y por el valor del TVC para una sincronización *fin*a, con una resolución por debajo del nanosegundo. Ambos valores se miden cuando la señal del PMT supera el límite del comparador. El esquema de funcionamiento es descrito en la Figura 3.9. Tres DACs controlan los límites de los comparadores, uno para el L0 y dos para el PSD.

La carga del pulso se integra por partes. Tres condensadores conmutados muestrean la señal del ánodo con un ciclo de periodo superior al tiempo de subida del pulso, que típicamente es de 8 ns. En cualquier momento un condensador está integrando la carga, otro se encuentra guardando la carga del periodo anterior y el último condensador se está reiniciando. La Figura 3.10 muestra este proceso.

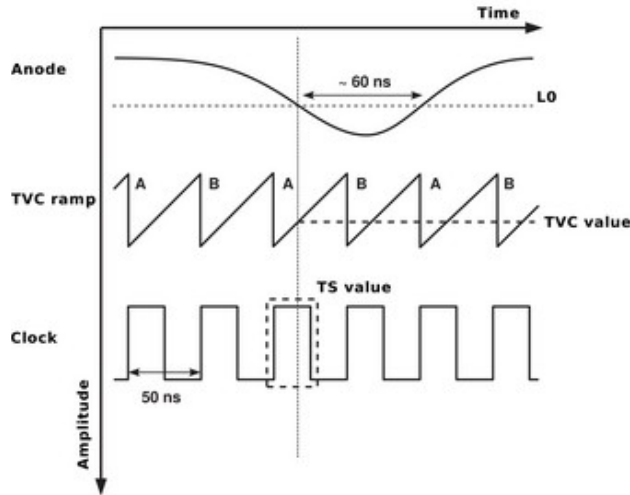
Cuando un *trigger* L0 ocurre, la integración de la corriente se alarga para abarcar la carga del pulso. Entonces, la carga del periodo anterior se añade. El PSD devuelve un resultado binario indicando si el pulso es del tipo SPE o del tipo WF. En ambos casos la información se guarda en memoria junto con la carga del pulso y los valores de TVC y de TS. Las células de la memoria están por lo tanto mezcladas, analógicas para el AVD y el TVC y digitales para el TS y el PSD. Si se selecciona el modo SPE, el único dato que será transmitido a los ADCs para la digitalización será el pulso de carga (el AVD produce un voltaje positivo proporcional a la carga integrada) y el tiempo (TVC). Si el pulso es del tipo WF, entonces el muestreo continúa durante 128 ciclos antes de parar. Los muestreos se mantienen en memoria, dentro



**Fig. 3.8:** Arquitectura del ARS. Se pueden observar los tres niveles de *trigger* con los que se trabaja en ANTARES así como el muestreador de 1 GHz o el discriminador de la forma del pulso [84].

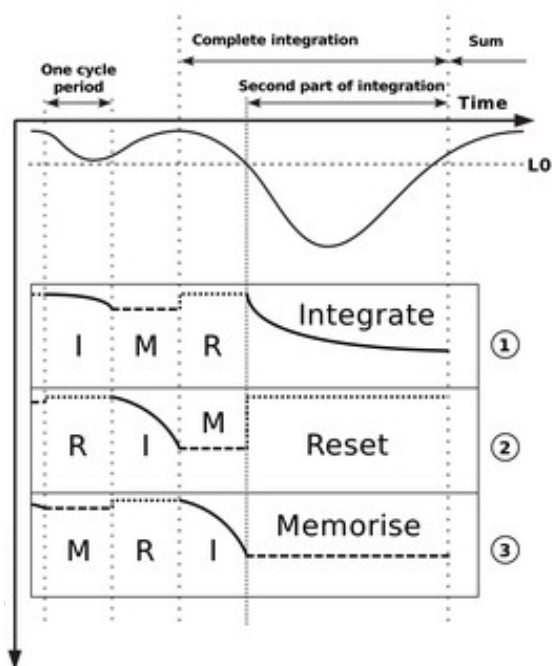
de las células de adquisición rápidas, esperando una posible petición de lectura.

En la arquitectura elegida por ANTARES un circuito ARS puede almacenar hasta 16 eventos SPE. En cuanto a eventos del tipo WF solo puede almacenarse uno. De hecho, el muestreo rápido no está disponible hasta que el circuito ha terminado de procesar el evento WF. En cambio, si ocurre un evento SPE el muestreador sigue estando disponible, con lo que se disminuye el tiempo muerto. Las señales analógicas son procesadas por 2 ADCs de 8 bits del tipo de aproximaciones sucesivas. El reloj utilizado para la conversión es un submúltiplo del reloj de *readout* de 12.5MHz, necesitándose 8 periodos para completar una conversión. Se realizan 6 medidas analógicas con diferentes rangos dinámicos que son digitalizadas por solo dos ADCs. El LSB (Bit Menos Significativo - *Less Significant Bit*) y el máximo voltaje convertible de cada ADC (voltaje de saturación  $V_{sat}$ ) se redefinen para cada evento teniendo en cuenta el canal en el que son procesados. Estos paráme-



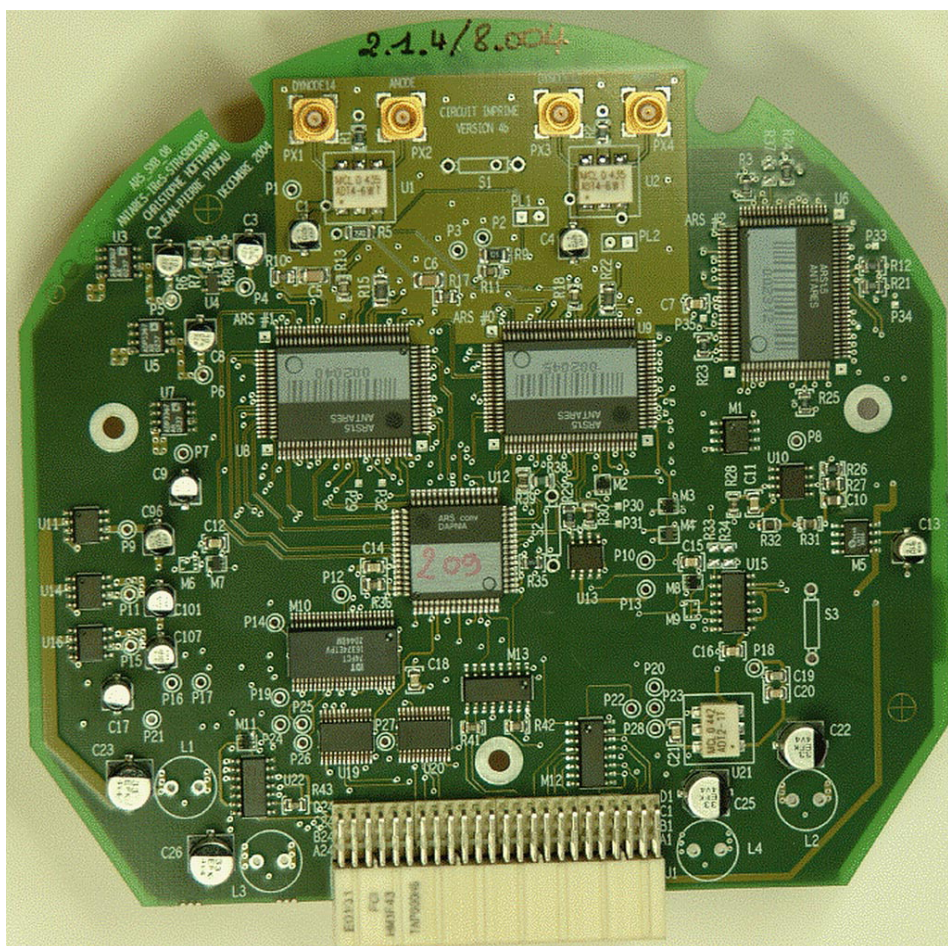
**Fig. 3.9:** Procedimiento de medida del tiempo en el ARS. Una marca de tiempo y tiempo de TVC son generados cuando la señal cruza el límite L0. La marca de tiempo viene determinada por el número de ciclos de 50 ns desde el último reset. El TVC da una sincronización más fina dentro del ciclos.

tros se seleccionan entre tres posible pares de valores guardados en bancos de registros a través del *slow control* durante la configuración inicial de los *chips*. Cada uno de los dos proporciona un valor digital al DAC de 5-bits, definiendo tanto la corriente para el LSB y para la  $V_{sat}$  respectivamente. La respuesta del ADC se modifica dinámicamente de evento a evento, siendo el secuenciador del *readout* el encargado de seleccionar cuál de los tres bancos se utiliza, dependiendo del tipo de datos a convertir. Para la digitalización de un evento guardado existen dos posibilidades. O bien todos los eventos son digitalizados sin un *trigger* externo, o bien una señal *trigger* externo L1 debe de llegar dentro de una ventana temporal predefinida asociada con el evento. La carga digitalizada, los valores del TVC y del TS y los valores digitalizados del WF, si están disponibles, son enviados en serie en formato binario. Si la ventana temporal acaba sin que ocurra un *trigger* L1, el bloque de memoria asociado con la ventana temporal y las células del muestreador se reinician para ser utilizadas por un evento nuevo. Las condiciones normales de ANTARES no requieren de *trigger* L1, por lo que



**Fig. 3.10:** Integración de la señal de carga con tres condensadors trabajando en diferentes fases. Cuando el L0 es superado, la rampa de voltaje se congela y memoriza.

todos los pulsos que superan el límite de L0 son enviados a la estación de control de la costa.



**Fig. 3.11:** Tarjeta electrónica de adquisición de ANTARES con los ARSs.



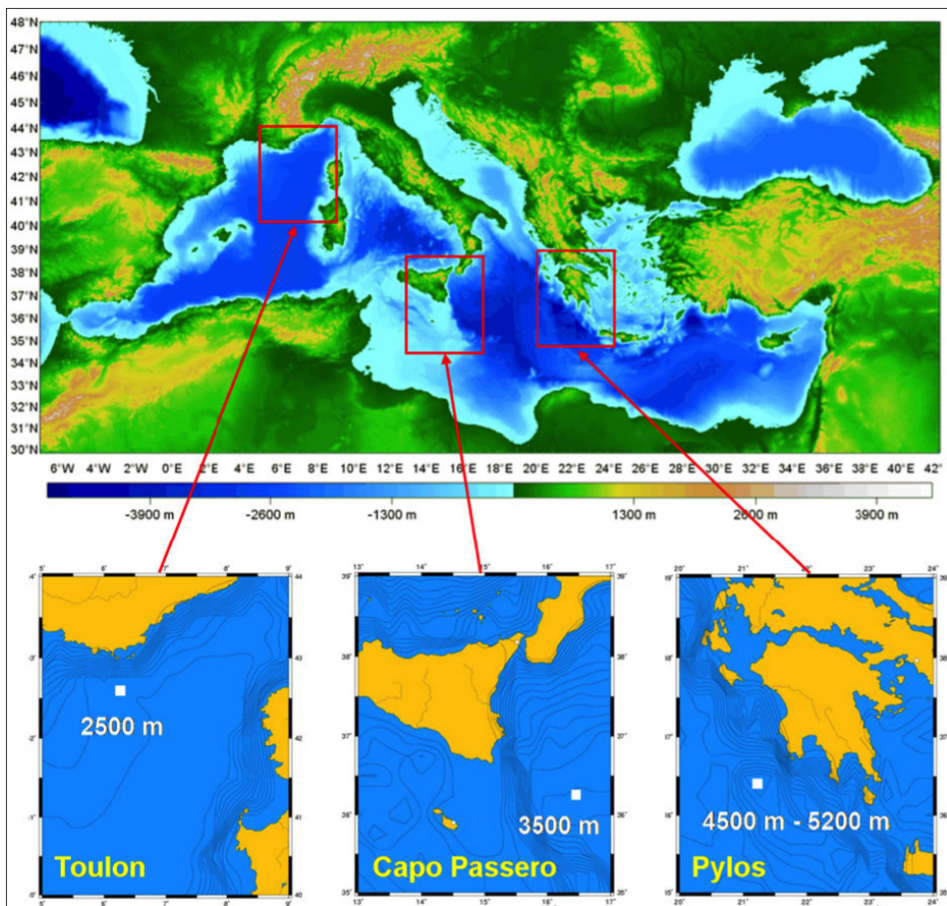
” *Quelle situation grosse de mystères l’avenir  
réservait aux investigations de la science!*

— Jules Verne

## 4.1 Introducción

KM3NeT es una infraestructura de investigación que se está construyendo actualmente en el mar Mediterráneo. Esta infraestructura estará formada por una red de telescopios de neutrinos que se instalarán en tres emplazamientos diferentes: KM3NeT-Fr, en las cercanías de Tolón, Francia; KM3NeT-It, en las cercanías de Portopalo di Capo Passero, en Sicilia, Italia; y KM3NeT-Gr, en las cercanías de Pylos, Grecia. La instalación de las primeras líneas o DUs (Unidad de Detección - *Detection Unit*) en el argot de KM3NeT se están instalando ya en KM3NeT-It y KM3NeT-Fr. En la Figura 4.1 se muestran las diferentes localizaciones de KM3NeT.

KM3NeT tiene su origen en la unión de los grupos de investigación de las colaboraciones que han trabajado en el desarrollo de telescopios de neutrinos en el mar Mediterráneo: NEMO (Sección 2.6), NESTOR (Sección 2.5.2.2) y ANTARES (Capítulo 3). Este consorcio se convirtió en una colaboración en 2013, iniciándose entonces la construcción del telescopio de neutrinos KM3NeT.



**Fig. 4.1:** Plano de situación de los tres emplazamientos de KM3NeT. Figura procedente de [86].

## 4.2 Ubicación de KM3NeT

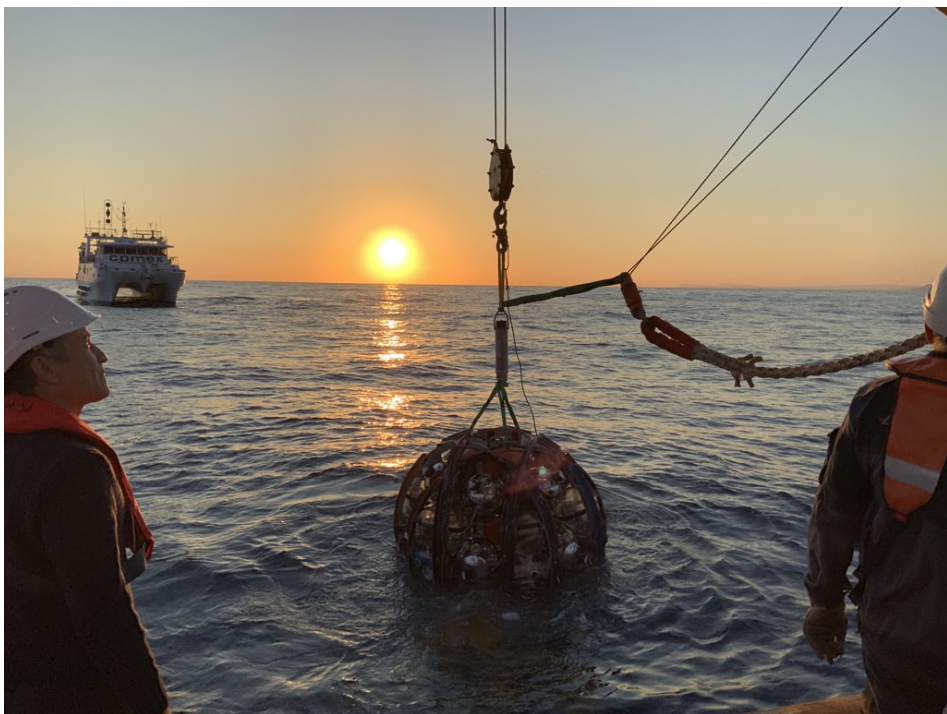
### 4.2.1 KM3NeT en Italia: ARCA

El emplazamiento italiano de KM3NeT se encuentra situado alrededor de unos 100 km de Capo Passero de Sicilia, Italia, concretamente en las coordenadas  $36^{\circ} 16' N$   $16^{\circ} 06' E$  y a 3500 m de profundidad. Es el antiguo emplazamiento de NEMO y está compartido con la infraestructura EMSO (*European Multidisciplinary Seafloor and water-column Observatory*) para investigaciones en Ciencias del Mar y de la Tierra.

La instalación en ARCA (Astroparticle Research with Cosmics in the Abyss) incluye dos BBs (*Building Block*), cada uno de ellos formado por 115 DUs, conectados con la costa por cables electro-ópticos. De los dos cables necesarios uno se encuentra ya instalado. Este cable tendrá 48 fibras ópticas. El cable se divide en dos ramas en las cercanías del detector, cada una de ellas terminada en un CTF (Marco de Terminación de Cable - *Cable Termination Frame*), que a su vez se conecta a una SJB (Caja de Conexión Secundaria - *Secondary Junction Box*), las cuales permiten conectar hasta siete DUs. La conexión de las DUs se realiza con cables de unión que yacen sobre el fondo marino. La distancia entre DUs es de 95 m. El cable electro-óptico utiliza una línea de 10 kV en continua para alimentar el BB, convirtiéndose posteriormente a 375 V en el CTF para transmitirse a través de las SJB y los cables de *interlink* a las DUs. La estación de control de la costa contiene la electrónica de recepción de datos y una granja de ordenadores utilizada para el filtrado de los mismos.

### 4.2.2 KM3NeT en Francia: ORCA

El emplazamiento francés de KM3NeT está localizado a 40 km al sur de Tolón, Francia albergando a ORCA (Oscillation Research with Cosmics in the Abyss). El sitio se encuentra a 2450 m de profundidad en las coordenadas  $42^{\circ} 48' N$   $06^{\circ} 02' E$  en el que se construirá un BB. La alimentación y los datos se transfieren desde (y hacia) el detector con dos cables electro-ópticos que incluyen las fibras ópticas y una línea de alimentación. Las DUs se conectan



**Fig. 4.2:** Unas de la líneas de detección, DU, de KM3NeT en el momento de su instalación.

a alguna de las cinco JBs, las cuales tienen ocho conectores de salidas en los que se puede conectar cuatro DUs encadenadas. Algunos de los encadenamientos pueden incluir CUs (Unidad de Calibración - *Calibration Unit*), las cuales incorporan diferentes instrumentos como son los hidrófonos o los *laser beacons*. Como en el caso de ARCA, las DUs se conectan a la JB y entre sí a través de cables de *interlink*. La distancia prevista entre las DUs es de 20 m.

La alimentación se transmite en alterna con un voltaje de 3.5 kV. En las JB este voltaje se convierte a 400 V para su transmisión a través de los cables de *interlink* y alimentar las DUs. La sala de control se encuentra situada en el instituto Michel Pacha, en La Seyne-sur-Mer, y alberga, como en el caso de ARCA, una granja de ordenadores para el filtrado de los datos proporcionados por el detector. Se prevé utilizar también el cable electro-óptico de ANTARES una vez este se desmantele.

## 4.3 La DU de KM3NeT

Cada una de las DUs de KM3NeT alberga 18 DOMs. En el caso de ARCA la línea tiene una altura de 700 m, con DOMs espaciados 36 m, mientras que en el caso de ORCA las líneas tienen una altura de 200 m, donde los DOMs están espaciados 9 m. Para mantenerlas verticales la parte final de la línea contiene una boya. Cada línea alberga dos cuerdas paralelas de 4 mm de diámetro a las cuales los DOMs se fijan mediante un collarín de titanio. Cada cierta distancia existen espaciadores para mantener las cuerdas paralelas. Fijado a las cuerdas se encuentra el cable electro-óptico, el cual contiene la línea de alimentación y 18 fibras ópticas para la transmisión de datos. En cada piso se derivan dos cables de alimentación y una fibra óptica para conectarse al DOM del piso. En el mismo elemento donde se realiza la derivación se encuentra un convertidor DC/DC (Corriente Continua a Corriente Continua - *Direct Current to Direct Current*) que convierte la tensión de 400 V a 12 V, siendo esta última la necesitada por los DOMs para funcionar. La entrada en la esfera del DOM se realiza a través del penetrador del DOM.

Para su instalación y almacenamiento, la DU se enrolla en una estructura esférica que se denomina LOM (*Launcher vehicle of Optical Modules*) y en la cual los DOMs tienen las cavidades necesarias. La Figura 4.2 muestra un LOM en el momento de su instalación. El ancla, situada en la parte inferior de la DU, es la interfaz con la infraestructura del fondo marino. El ancla es lo suficientemente pesada para mantener la DU fijada al fondo. El contenedor de la base contiene los componentes ópticos y electrónicos necesarios además de un receptor acústico utilizado para posicionar los elementos del detector.

Se utiliza un barco con capacidad de posicionamiento dinámico en cada sitio para la instalación de las DUs en la posición planeada con una precisión de un metro. Para instalar y conectar los cables de interconexión desde la base de las DUs hasta la JB se utiliza un ROV. Una vez se ha realizado la conexión, se envía una señal acústica desde el barco para iniciar el proceso de desenrollado de la DU, que se encontraba enrollada en el LOM. Cuando

la DU se ha desenrollado completamente del LOM, este asciende hacia la superficie donde es recuperado para ser utilizado en una operación de instalación posterior. La utilización de este método reduce el volumen ocupado por las DUs durante el transporte, se aumenta la capacidad de instalación de DUs por operación marina, se reducen los costes y se aumenta la seguridad durante la instalación. La Figura 4.3 muestra un esquema de una DU de KM3NeT.

## 4.4 El DOM de KM3NeT

El DOM consiste en una esfera de vidrio transparente de 17 pulgadas de diámetro que alberga 31 fotomultiplicadores (PMTs) y la electrónica de *readout* asociada que se describe en detalle en el Capítulo 6.

El diseño del DOM tiene varias ventajas con respecto a los módulos tradicionales que utilizan PMTs de gran fotocátodo. Así por ejemplo, una sola esfera tiene entre tres y cuatro veces más área de fotocátodo y una cobertura angular mucho más uniforme. Otra de las ventajas radica en que el área del fotocátodo está segmentada, por lo que la identificación de más de un fotoelectrón puede hacerse con mayor eficiencia. Además, la información direccional proporciona una mayor protección para evitar el fondo óptico.

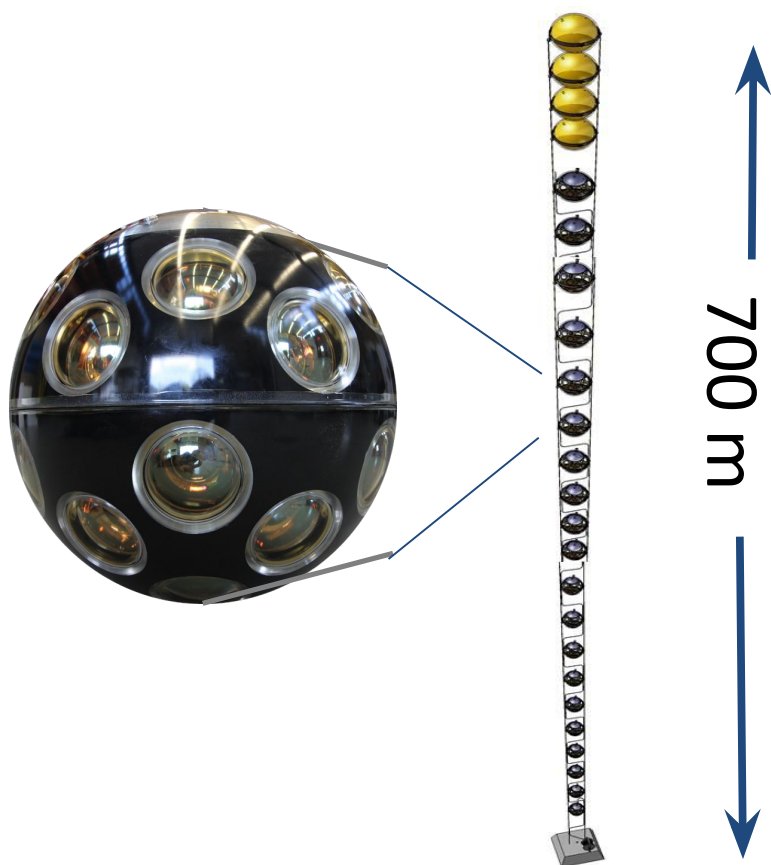
Los PMTs se organizan en 5 anillos de 6 PMTs más otro PMT en el fondo de la esfera apuntando hacia abajo. Los PMTs están espaciados  $60^\circ$  en azimut y los sucesivos anillos se encuentran escalonados  $30^\circ$ .

Hay 19 PMTs en el hemisferio inferior y 12 PMTs en el hemisferio superior. Los PMTs están fijados en la esfera por un soporte que se ha impreso en 3D. La eficiencia de los PMTs se incrementa entre un 20 y un 40 % mediante un anillo reflector que se sitúa alrededor de cada PMT. Para asegurar un contacto óptico óptimo se rellena el hueco entre el soporte y la esfera de cristal con un gel óptico. La Figura 4.4 muestra un DOM de KM3NeT.

Los PMTs tienen un diámetro de fotocátodo de al menos 72 mm y una longitud menor a 122 mm. El reflector aumenta el diámetro hasta los

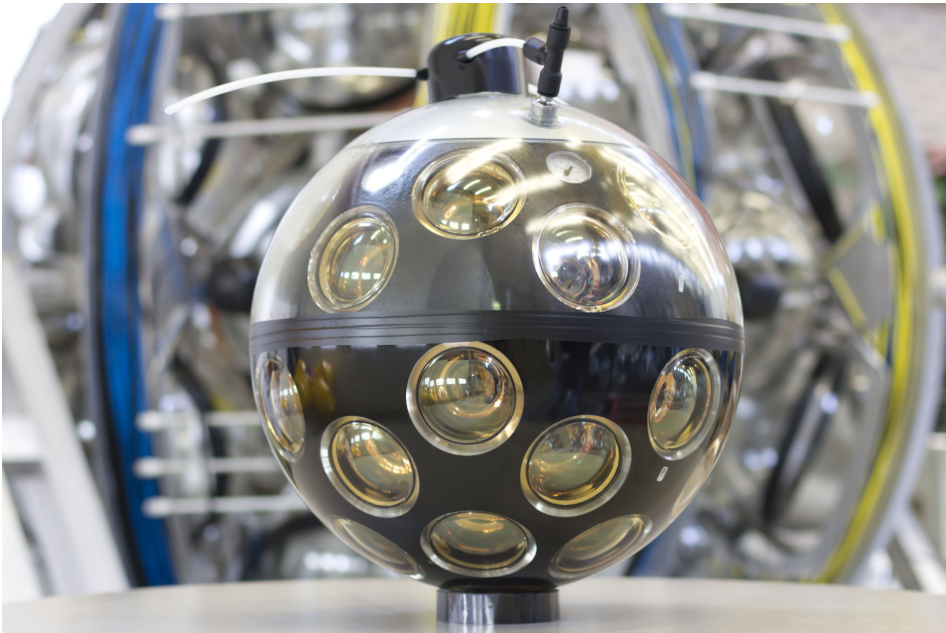
85 mm. El fotomultiplicador tiene una estructura de 10 etapas de dínodos con una ganancia mínima de  $10^6$ .

La cara frontal del PMT es convexa con un radio menor al radio interior de la esfera de cristal. Debido al pequeño tamaño del PMT la influencia del campo magnético de la Tierra es despreciable y no es necesario utilizar una rejilla de apantallamiento de *mu-metal*.



**Fig. 4.3:** Esquema de una línea de detección, DU, de KM3NeT.





**Fig. 4.4:** DOM de KM3NeT. Se puede observar la distribución de PMTs en la esfera. En el fondo, difuminado, uno de los LOMs de KM3NeT, donde se colocan las líneas de detección, DUs, para su instalación.



# Bloque II

---

Publicaciones



# Instrumentación de Calibración Temporal para Telescopios de Neutrinos Submarinos

” *The progress of science is dependent on the  
sophistication of instrumentation*

— Mieke Boon

## 5.1 The ANTARES Optical Beacon System

Este artículo se publicó en la revista “ Nuclear Instruments and Methods in Physics Research, Section A: Accelerators, Spectrometers, Detectors and Associated Equipment” en agosto 2007.

En esta revista todos los artículos son revisados por pares.

De acuerdo con la edición de ese año del Journal Citation Reports, esta revista figura con un índice de impacto de 1,114 y se encuentra en el segundo cuartil del área “Instruments & Instrumentation”.

En el artículo se describe el sistema de calibración temporal basado en balizas ópticas (Optical Beacons) desarrollado para el telescopio de neutrones ANTARES. Dicho sistema consiste en un conjunto de fuentes luminosas distribuidas por todo el detector y que proporcionan pulsos de luz de corta duración y potencia controlable. En particular, se trata de fuentes led y láseres que pueden ser controladas remotamente. En el artículo se describen tanto el diseño, test, construcción y primeros resultados de la calibración temporal. Este sistema de calibración tiene en cuenta las propiedades ópticas del agua marina, la cual se utiliza en ANTARES como volumen de detección.

## The ANTARES optical beacon system

M. Ageron<sup>e</sup>, J.A. Aguilar<sup>j,\*</sup>, A. Albert<sup>u</sup>, F. Ameli<sup>x</sup>, M. Anghinolfi<sup>i</sup>, G. Anton<sup>g</sup>, S. Anvar<sup>y</sup>,  
F. Ardellier-Desages<sup>y</sup>, E. Aslanides<sup>e</sup>, J.-J. Aubert<sup>e</sup>, R. Auer<sup>g</sup>, E. Barbarito<sup>b</sup>, S. Basa<sup>r</sup>,  
M. Battaglieri<sup>i</sup>, Y. Becherini<sup>c,1</sup>, J. Beltramelli<sup>y</sup>, V. Bertin<sup>e</sup>, A. Bigi<sup>w</sup>, M. Billault<sup>e</sup>, R. Blaes<sup>u</sup>,  
N. de Botton<sup>y</sup>, M.C. Bouwhuis<sup>v</sup>, S.M. Bradbury<sup>t</sup>, R. Bruijn<sup>v,ab</sup>, J. Brunner<sup>e</sup>, G.F. Burgio<sup>f</sup>,  
J. Busto<sup>e</sup>, F. Cafagna<sup>b</sup>, L. Caillat<sup>e</sup>, A. Calzas<sup>e</sup>, A. Capone<sup>x</sup>, L. Caponetto<sup>f</sup>, E. Carmona<sup>j</sup>,  
J. Carr<sup>e</sup>, S.L. Cartwright<sup>z</sup>, D. Castel<sup>u</sup>, E. Castorina<sup>w</sup>, V. Cavasinni<sup>w</sup>, S. Cecchini<sup>c,m</sup>, A. Ceres<sup>b</sup>,  
P. Charvis<sup>h</sup>, P. Chauchot<sup>k</sup>, T. Chiarusi<sup>x</sup>, M. Circella<sup>b</sup>, C. Colnard<sup>v</sup>, C. Compère<sup>k</sup>,  
R. Coniglione<sup>s</sup>, N. Cottini<sup>w,1</sup>, P. Coyle<sup>e</sup>, S. Cuneo<sup>i</sup>, A.-S. Cussatlegras<sup>d</sup>, G. Damy<sup>k</sup>,  
R. van Dantzig<sup>v</sup>, G. De Bonis<sup>x</sup>, C. De Marzo<sup>b,†</sup>, R. De Vita<sup>i</sup>, I. Dekeyser<sup>d</sup>, E. Delagnes<sup>y</sup>,  
D. Denans<sup>y</sup>, A. Deschamps<sup>h</sup>, J.-J. Destelle<sup>e</sup>, B. Dinkespieler<sup>e</sup>, C. Distefano<sup>s</sup>, C. Donzaud<sup>y,2</sup>,  
J.-F. Drogou<sup>l</sup>, F. Druillol<sup>y</sup>, D. Durand<sup>y</sup>, J.-P. Ernenwein<sup>u</sup>, S. Escoffier<sup>e</sup>, E. Falchini<sup>w</sup>,  
S. Favard<sup>e</sup>, F. Fehr<sup>g</sup>, F. Feinstein<sup>e</sup>, S. Ferry<sup>n</sup>, C. Fiorello<sup>b</sup>, V. Flaminio<sup>w</sup>, K. Fratini<sup>i</sup>,  
J.-L. Fuda<sup>d</sup>, S. Galeotti<sup>w</sup>, J.-M. Gallone<sup>n</sup>, G. Giacomelli<sup>c</sup>, N. Girard<sup>u</sup>, C. Gojak<sup>e</sup>, Ph. Goret<sup>y</sup>,  
K. Graf<sup>g</sup>, G. Hallewell<sup>e</sup>, M.N. Harakeh<sup>q</sup>, B. Hartmann<sup>g</sup>, A. Heijboer<sup>v,ab</sup>, E. Heine<sup>v</sup>, Y. Hello<sup>h</sup>,  
J.J. Hernández-Rey<sup>j</sup>, J. Höfl<sup>g</sup>, C. Hoffman<sup>n</sup>, J. Hogenbirk<sup>v</sup>, J.R. Hubbard<sup>y</sup>, M. Jaquet<sup>e</sup>,  
M. Jaspers<sup>v,ab</sup>, M. de Jong<sup>v</sup>, F. Jouvenot<sup>y,3</sup>, N. Kalantar-Nayestanaki<sup>q</sup>, A. Kappes<sup>g</sup>, T. Karg<sup>g</sup>,  
U. Katz<sup>g</sup>, P. Keller<sup>e</sup>, E. Kok<sup>v</sup>, H. Kok<sup>v</sup>, P. Kooijman<sup>v,aa</sup>, C. Kopper<sup>g</sup>, E.V. Korolkova<sup>z</sup>,  
A. Kouchner<sup>a</sup>, W. Kretschmer<sup>g</sup>, A. Kruijer<sup>v</sup>, S. Kuch<sup>g</sup>, V.A. Kudryavstev<sup>z</sup>, P. Lagier<sup>e</sup>,  
R. Lahmann<sup>g</sup>, G. Lamanna<sup>e</sup>, P. Lamare<sup>y</sup>, G. Lambard<sup>e</sup>, J.-C. Languillat<sup>y</sup>, H. Laschinsky<sup>g</sup>,  
J. Laval<sup>e</sup>, Y. Le Guen<sup>k</sup>, H. Le Provost<sup>y</sup>, A. Le Van Suu<sup>e</sup>, D. Lefèvre<sup>d</sup>, T. Legou<sup>e</sup>,  
G. Lelaizant<sup>e</sup>, G. Lim<sup>v,ab</sup>, D. Lo Presti<sup>f</sup>, H. Loehner<sup>q</sup>, S. Loucatos<sup>y</sup>, F. Louis<sup>y</sup>, F. Lucarelli<sup>x</sup>,  
V. Lyashuk<sup>p</sup>, M. Marcelin<sup>r</sup>, A. Margiotto<sup>c</sup>, R. Masullo<sup>x</sup>, F. Mazéas<sup>k</sup>, A. Mazure<sup>r</sup>,  
J.E. McMillan<sup>z</sup>, R. Megna<sup>b</sup>, M. Melissas<sup>e</sup>, E. Migneco<sup>s</sup>, A. Milovanovic<sup>t</sup>, M. Mongelli<sup>b</sup>,  
T. Montaruli<sup>b,4</sup>, M. Morganti<sup>w</sup>, L. Moscoso<sup>y,a</sup>, M. Musumeci<sup>s</sup>, M. Naumann-Godo<sup>g</sup>,  
C. Naumann<sup>g</sup>, V. Niess<sup>e</sup>, T. Noble<sup>e</sup>, C. Olivetto<sup>n</sup>, R. Ostasch<sup>g</sup>, N. Palanque-Delabrouille<sup>y</sup>,  
P. Payre<sup>e</sup>, H. Peek<sup>v</sup>, A. Perez<sup>j</sup>, C. Petta<sup>f</sup>, P. Piattelli<sup>s</sup>, R. Pillet<sup>h</sup>, J.-P. Pineau<sup>n</sup>, J. Poinsignon<sup>y</sup>,  
V. Popa<sup>o</sup>, T. Pradier<sup>n</sup>, C. Racca<sup>n</sup>, N. Randazzo<sup>f</sup>, J. van Randwijk<sup>v</sup>, D. Real<sup>l</sup>, B. van Rens<sup>v</sup>,  
F. Réthoré<sup>e</sup>, P. Rewiersma<sup>v,†</sup>, G. Riccobene<sup>s</sup>, V. Rigaud<sup>l</sup>, M. Ripani<sup>i</sup>, V. Roca<sup>j</sup>, C. Roda<sup>w</sup>,  
J.F. Rolin<sup>k</sup>, H.J. Rose<sup>t</sup>, A. Rostovtsev<sup>p</sup>, J. Roux<sup>e</sup>, M. Ruppi<sup>b</sup>, G.V. Russo<sup>f</sup>, G. Rusydi<sup>q</sup>,  
F. Salesa<sup>j</sup>, K. Salomon<sup>g</sup>, P. Sapienza<sup>s</sup>, F. Schmitt<sup>g</sup>, J.-P. Schuller<sup>y</sup>, R. Shanidze<sup>g</sup>, I. Sokalski<sup>b</sup>,  
T. Spona<sup>g</sup>, M. Spurio<sup>c</sup>, G. van der Steenhoven<sup>v</sup>, T. Stolarczyk<sup>y</sup>, K. Streeb<sup>g</sup>, L. Sulak<sup>e</sup>,  
M. Taiuti<sup>i</sup>, C. Tamburini<sup>d</sup>, C. Tao<sup>e</sup>, G. Terreni<sup>w</sup>, L.F. Thompson<sup>z</sup>, F. Urbano<sup>j</sup>, P. Valdy<sup>l</sup>,  
V. Valente<sup>x</sup>, B. Vallage<sup>y</sup>, G. Vaudaine<sup>j</sup>, G. Venekamp<sup>v</sup>, B. Verlaat<sup>v</sup>, P. Vernin<sup>y</sup>,

\*Corresponding author.

E-mail address: [J.A.Aguilar@ific.uv.es](mailto:J.A.Aguilar@ific.uv.es) (J.A. Aguilar).

G. de Vries-Uiterweerd<sup>v,aa</sup>, R. van Wijk<sup>v</sup>, G. Wijnker<sup>v</sup>, P. de Witt Huberts<sup>v</sup>, G. Wobbe<sup>g</sup>,  
E. de Wolf<sup>v,ab</sup>, A-F. Yao<sup>d</sup>, D. Zaborov<sup>p</sup>, H. Zacccone<sup>y</sup>, J.D. Zornoza<sup>j</sup>, J. Zúñiga<sup>j</sup>

<sup>a</sup>APC – AstroParticule et Cosmologie, 10, rue Alice Domon et Léonie Duquet 75205 Paris Cedex 13, France

<sup>b</sup>Dipartimento Interateneo di Fisica e Sezione INFN, Via E. Orabona 4, 70126 Bari, Italy

<sup>c</sup>Dipartimento di Fisica dell'Università e Sezione INFN, Viale Berti Pichat 6/2, 40127 Bologna, Italy

<sup>d</sup>COM – Centre d'Océanologie de Marseille, CNRS/INSU et Université de la Méditerranée, 163 Avenue de Luminy, Case 901, 13288 Marseille Cedex 9, France

<sup>e</sup>CPPM – Centre de Physique des Particules de Marseille, CNRS/IN2P3 et Université de la Méditerranée, 163 Avenue de Luminy, Case 902, 13288 Marseille Cedex 9, France

<sup>f</sup>Dipartimento di Fisica ed Astronomia dell'Università e Sezione INFN, Viale Andrea Doria 6, 95125 Catania, Italy

<sup>g</sup>Friedrich-Alexander-Universität Erlangen-Nürnberg, Physikalisches Institut, Erwin-Rommel-Str. 1, D-91058 Erlangen, Germany

<sup>h</sup>GéoSciences Azur, CNRS/INSU, IRD, Université de Nice Sophia-Antipolis, Université Pierre et Marie Curie – Observatoire Océanologique de Villefranche, BP48, 2 quai de la Darse, 06235 Villefranche-sur-Mer Cedex, France

<sup>i</sup>Dipartimento di Fisica dell'Università e Sezione INFN, Via Dodecaneso 33, 16146 Genova, Italy

<sup>j</sup>IFIC – Instituto de Física Corpuscular, Edificios de Investigación de Paterna, CSIC – Universitat de València, Apdo. de Correos 22085, 46071 Valencia, Spain

<sup>k</sup>IFREMER – Centre de Brest, BP 70, 29280 Plouzané, France

<sup>l</sup>IFREMER – Centre de Toulon/La Seyne Sur Mer, Port Brégaillon, Chemin Jean-Marie Fritz, 83500, La Seyne sur Mer, France

<sup>m</sup>INAF-IASF, via P. Gobetti 101, 40129 Bologna, Italy

<sup>n</sup>IPHC – Institut Pluridisciplinaire Hubert Curien, Université Louis Pasteur (Strasbourg 1) et IN2P3/CNRS, 23 rue du Loess, BP 28, 67037 Strasbourg Cedex 2, France

<sup>o</sup>Institute for Space Sciences, R-77125 Bucharest - Măgurele, Romania

<sup>p</sup>ITEP – Institute for Theoretical and Experimental Physics, B. Cheremushkinskaya 25, 117259 Moscow, Russia

<sup>q</sup>Kernfysisch Versneller Instituut (KVI), University of Groningen, Zernikelaan 25, 9747 AA Groningen, The Netherlands

<sup>r</sup>LAM – Laboratoire d'Astrophysique de Marseille, CNRS/INSU et Université de Provence, Traverse du Siphon – Les Trois Lucs, BP 8, 13012 Marseille Cedex 12, France

<sup>s</sup>INFN – Laboratori Nazionali del Sud (LNS), Via S. Sofia 44, 95123 Catania, Italy

<sup>t</sup>School of Physics & Astronomy, University of Leeds LS2 9JT, UK

<sup>u</sup>GRPHE – Groupe de Recherche en Physique des Hautes Energies, Université de Haute Alsace, 61 Rue Albert Camus, 68093 Mulhouse Cedex, France

<sup>v</sup>Nationaal Instituut voor Kernfysica en Hoge-Energiefysica (NIKHEF), Kruislaan 409, 1098 SJ Amsterdam, The Netherlands

<sup>w</sup>Dipartimento di Fisica dell'Università e Sezione INFN, Largo B. Pontecorvo 3, 56127 Pisa, Italy

<sup>x</sup>Dipartimento di Fisica dell'Università "La Sapienza" e Sezione INFN, P.le Aldo Moro 2, 00185 Roma, Italy

<sup>y</sup>DSM/Dapnia – Direction des Sciences de la Matière, laboratoire de recherche sur les lois fondamentales de l'Univers, CEA Saclay, 91191 Gif-sur-Yvette Cedex, France

<sup>z</sup>Department of Physics and Astronomy, University of Sheffield, Sheffield S3 7RH, UK

<sup>aa</sup>Faculteit Betawetenschappen, Universiteit Utrecht, Princetonplein 5, 3584 CC Utrecht, The Netherlands

<sup>ab</sup>Instituut voor Hoge-Energiefysica, Universiteit van Amsterdam, Kruislaan 409, 1098 SJ Amsterdam, The Netherlands

Received 12 March 2007; received in revised form 16 May 2007; accepted 22 May 2007

Available online 13 June 2007

## Abstract

ANTARES is a neutrino telescope being deployed in the Mediterranean Sea. It consists of a three-dimensional array of photomultiplier tubes that can detect the Cherenkov light induced by charged particles produced in the interactions of neutrinos with the surrounding medium. High angular resolution can be achieved, in particular, when a muon is produced, provided that the Cherenkov photons are detected with sufficient timing precision. Considerations of the intrinsic time uncertainties stemming from the transit time spread in the photomultiplier tubes and the mechanism of transmission of light in sea water lead to the conclusion that a relative time accuracy of the order of 0.5 ns is desirable. Accordingly, different time calibration systems have been developed for the ANTARES telescope. In this article, a system based on Optical Beacons, a set of external and well-controlled pulsed light sources located throughout the detector, is described. This calibration system takes into account the optical properties of sea water, which is used as the detection

<sup>1</sup>Now at: DSM/Dapnia – Direction des Sciences de la Matière, laboratoire de recherche sur les lois fondamentales de l'Univers, CEA Saclay, 91191 Gif-sur-Yvette Cedex, France.

<sup>2</sup>Also at: Orsay – Université Paris-Sud, CNRS-IN2P3, Institut de Physique Nucléaire (UMR 8608) ORSAY, F-91406, France.

<sup>3</sup>Now at: Department of Physics, University of Liverpool, UK.

<sup>4</sup>On leave at University of Wisconsin-Madison, 53706, WI, USA.

<sup>†</sup>Deceased.



volume of the ANTARES telescope. The design, tests, construction and first results of the two types of beacons, LED and laser-based, are presented.

© 2007 Elsevier B.V. All rights reserved.

PACS: 95.55.Vj; 95.85.Ry

Keywords: Neutrino telescope; Time calibration; Optical beacon

## 1. Introduction

The ANTARES telescope is an underwater neutrino detector being deployed in the Mediterranean Sea at a depth of 2500 m offshore from Toulon (France) [1]. This detector, which is a first step toward a km<sup>3</sup>-scale undersea neutrino telescope, will consist of twelve lines with a sensitive area for high energy muons of more than 0.05 km<sup>2</sup> for  $E_\mu > 100$  TeV. The construction of the ANTARES neutrino telescope started with the installation of the first lines in 2006, and the detector is scheduled to be completed by the end of 2007. In addition, a special instrumentation line, the MILOM [2] is in operation since Spring 2005. The detection principle and the main detector components are briefly described in Section 2. The precision required in the time determination and the different time calibration systems are reviewed in Section 3. The concept of an Optical Beacon system is briefly introduced and the actual solution adopted by ANTARES is reviewed in Section 4. Detailed descriptions of the LED and Laser Beacon calibration systems are given in Sections 5 and 6, respectively. Some results from the first data taken with the lines in operation in 2006 are given in Section 7. Finally, Section 8 presents the summary and conclusions.

## 2. The ANTARES neutrino telescope

The ANTARES neutrino telescope uses sea water as the detection medium to look for extra-terrestrial neutrinos. Most of these neutrinos cross right through the Earth without interacting. A small fraction of the incoming neutrino flux, however, interacts with the nucleons that make up the matter surrounding the detector. In a charged current interaction a high energy muon neutrino produces a muon which induces Cherenkov light when crossing a suitable optical medium such as ice or water. Other signatures can also be detected.

In order to detect and reconstruct the wavefront of the Cherenkov light, ANTARES is equipped with 900 Optical Modules (OMs). The OM, the basic optical unit of ANTARES, consists of a photomultiplier tube (PMT) housed in a water-pressure resistant glass sphere [3]. An exhaustive study of PMTs was carried out during the R&D phase which led to the selection of the 14-stage, 10" Hamamatsu R7081-20 model [4]. Together with the PMT there is an internal LED for calibration purposes inside the OM. Each group of three OMs constitutes a storey. All the electronics for one storey are housed in a pressure resistant

titanium container making up the so-called Local Control Module (LCM). Every OM is read out by an electronics board housed in the LCM carrying a pair of Analogue Ring Samplers (ARS), the ASIC chip used for signal processing and digitization [5]. The ARS provides the time and amplitude of the signal, both of which are essential to reconstruct the muon track direction and estimate its energy. The Time to Voltage converter (TVC) of the ARS provides two ramps of 50 ns that enable the determination of the exact timing within the cycle of the 20 MHz clock where the signal crossed the ARS threshold. The threshold time is transformed into an 8-bit binary number by the TVC, providing a theoretical accuracy of 0.2 ns. The actual accuracy is slightly higher since less than the full 256 bin range in the TVC is used.

## 3. The ANTARES time calibration systems

ANTARES is expected to achieve very good angular resolution ( $< 0.3^\circ$  for muon events above 10 TeV). This pointing accuracy is closely related to the precision in the determination of the arrival time of the Cherenkov photons at the PMTs. The relative time resolution between OMs is, therefore, of utmost importance. It is limited by the transit time spread (TTS) of the signal in the PMTs ( $\sigma \sim 1.3$  ns) and by the scattering and chromatic dispersion of light in sea water ( $\sigma \sim 1.5$  ns for a light propagation of 40 m) [6,7]. The electronics of the ANTARES detector is designed in order to contribute less than 0.5 ns to the overall time resolution. Therefore, the time calibration should aim at a precision below the nanosecond level. To this end, several complementary time calibration systems are implemented in the ANTARES detector in order to measure and monitor the relative times between different components of the detector due to, e.g. cable lengths and electronics delays. These time calibrations are performed by the following systems:

- (1) The *internal clock* calibration system. A very precise time reference clock distribution system has been implemented in the ANTARES detector. It consists of a 20 MHz clock generator on shore, a clock distribution system and a clock signal transceiver board placed in each LCM. A common clock signal is provided to the ARSs. Synchronised data commands can be superimposed on the clock signal, in particular, *start* and *stop* commands, which together with a high precision Time to Digital Converter (TDC) make up the essential components of the system. This system

also includes an echo-based time calibration whereby each LCM clock electronics board is able to send back a return signal through the same optical path as the outgoing clock signals. This system enables the time offsets between all LCM clock boards to be measured by recording the propagation delays of the return signals of each storey with respect to the original clock signal emission time. Measurements in real conditions show a resolution of  $\sim 0.1$  ns, well within the specifications. The system also includes the synchronisation with respect to Universal Time, by assigning the GPS timestamp to the data, with a precision of about 100  $\mu$ s, much better than the required precision of  $\sim 1$  ms. The clock signals are distributed across all detector components from the shore up to the clock boards. The remaining path between these boards and the PMT photocathodes, however, requires a different timing calibration mechanism.

- (2) The *internal Optical Module LEDs*. Inside each OM there is a blue LED attached to the back of the PMT capable of illuminating the photocathode. The LED is an HLMP-CB15 from Agilent whose light intensity is peaked at around 470 nm with an FWHM of 15 nm. These LEDs are used to measure the relative variation of the PMT transit time and dedicated runs of this LED calibration system are customarily taken [2]. This system is used to calibrate the path travelled by the signal starting at the PMT photocathode up to the read-out electronics. The effect of the transmission of the light in water is, however, not addressed by this calibration method.
- (3) The *Optical Beacons*. This system allows the relative time calibration of different OMs to be determined by means of independent and well-controlled pulsed light sources. This system also makes possible to monitor the influence of the water on the light propagation. These Optical Beacons are the subject of this paper and will be described in detail in the following sections.
- (4) Several thousands of down-going *muon tracks* will be detected per day. The hit time residuals of the reconstructed muon tracks can be used to monitor the time offsets of the OMs. This methodology will enable an overall space-time alignment and calibration cross-checks.

Prior to the deployment of the lines, all line elements are verified as functioning correctly in a dedicated dark setup where a time calibration is carried out after the integration of each sector of the line (a sector is one fifth of a line). An optical signal is sent to each OM of every storey. The signal is provided by a Nd-YAG solid state laser that emits intense, short duration light pulses. The light pulse is attenuated before being sent to the OMs. The light is guided through an optical fibre to a 1-to-16 optical splitter. Each of the outgoing fibres is connected to one of the 15 OMs of the sector. The 16th signal is sent to a control

module and is used as a time reference. The resulting information from timing calibration in the dark setup is used as the reference for the validation of the in situ timing calibrations. This system is also used to determine the time calibration of the Optical Beacons.

The time calibration depends on the actual location of the OMs which is affected by the slow movements of the lines due to underwater currents. An acoustic positioning system together with a set of compasses and tiltmeters located along the line, provides the OM position with an accuracy of 10–20 cm which, in addition to the time calibration, is sufficient for the muon track reconstruction [2].

The time offsets determined in the laboratory are not expected to change dramatically once the lines are installed at the detector site. Using these values and the positions of the OMs as determined by the acoustic and compass/tiltmeter positioning systems, one has in principle all the ingredients needed for an accurate track reconstruction. However, an in situ calibration system is required to monitor and correct for unlikely, but not excluded, time inaccuracies stemming from different sources, such as an imprecise calibration in the laboratory of some of the OMs or small shifts in time offsets due to a variety of sources, like PMT voltage variation. The several thousands of down-going muon tracks that are expected to be reconstructed each year can be used to refine time calibration. However, these will not provide hits uniformly distributed throughout the detector and only the most frequently hit OMs will collect sufficient statistics in a reasonable amount of time to allow such calibration. Moreover, the Optical Beacon system makes possible some other measurements that enable a better tuning of the event simulation programs. This is the case of the in situ determination of the optical properties of the surrounding sea water, i.e. the absorption and scattering lengths or the estimate of the efficiency of point bright source algorithms used in shower reconstruction using the light coming from the beacons. These determinations are under way and will be the subject of a future publication. In addition, the Optical Beacon system provides an overall cross-check of the detector calibration since their results depend on the good performance of the other systems, in particular, of the clock and positioning systems.

In sea water, the Cherenkov light propagates according to the group velocity, not the phase velocity. The (wavelength dependent) phase refractive index,  $n_\phi$ , only determines the Cherenkov angle. A group refractive index,  $n_g$ , is introduced so that the group velocity can be expressed as  $v_g = c/n_g$ . The phase and group refractive indexes are related by the following formula:

$$n_g = \frac{n_\phi}{1 + (dn_\phi/n_\phi)/(d\lambda/\lambda)}. \quad (1)$$

The wavelength dependence is stronger for  $n_g$  than for  $n_\phi$ . In the reconstruction of the tracks a particular value of the group refractive index must be assumed to calculate the arrival time of direct photons from a particular track.

This is chosen to be the value at 460 nm, corresponding to the longest absorption length and maximal PMT efficiency. This introduces a shift and a smearing (uncertainty in the true travel time) due to the fact that other wavelengths are also present (the intensity of the Cherenkov light is inversely proportional to the wavelength) but the PMT is colour blind within its operating range. This chromatic dispersion is not independent of the absorption and scattering lengths, since these will change the wavelength distribution at a given distance from the track to the PMT. The distance dependent time shifts can be in principle corrected. The smearing, however, cannot. The effect is not very large: at  $\sim 50$  m, where a large fraction of the hits are expected, its sigma is around 1.3 ns.

The light from the beacons does not suffer from these effects, since the laser is monochromatic and the LEDs have a very narrow wavelength range (15 nm).

#### 4. The ANTARES optical beacon system

The Optical Beacon system consists of a series of pulsed light sources distributed throughout the detector. An LED Beacon is composed of several LEDs, pulsed by dedicated electronic circuits. Those beacons are located, more or less, uniformly along every detector line so that their light can illuminate all storeys on the neighbouring lines. The Laser Beacons use a solid state pulsed laser whose light is spread out by a diffuser. Laser Beacons are located at the bottom of a few lines in the so-called Bottom String Socket. The Laser Beacons illuminate mainly the bottom part of the lines and are located in a stationary position. The system of Optical Beacons provides a number of well-controlled, pulsed light sources that act as a reference for time calibration of the detector. The system is able to closely monitor all the detector components and the sea water. It allows the monitoring of the absorption and scattering lengths of the sea water.

#### 5. The LED beacons

A LED Beacon contains 36 individual LEDs arranged in groups of six, on six vertical boards (*faces*) which are placed side by side forming a hexagonal cylinder (Fig. 1). On each face, one LED points upwards (*top LED*), and the other five LEDs point radially outwards. One of the LEDs that points horizontally is located in the middle of the face (*central LED*) and the remaining four surround it.

The faces are mechanically fixed to a hollow nylon structure which internally houses a small Hamamatsu H6780-03 photomultiplier tube. This PMT, with a photocathode of 8 mm diameter, has a risetime of 0.8 ns and a transit time of 5.4 ns and is used to provide the precise time of emission of the light flash independently of the triggering signal. A flat acrylic disc that acts as a lightguide is fixed to the upper part of the nylon mounting to increase the collection of light. Following Fields and Janowski [9] a conical depression was machined in the centre of the light

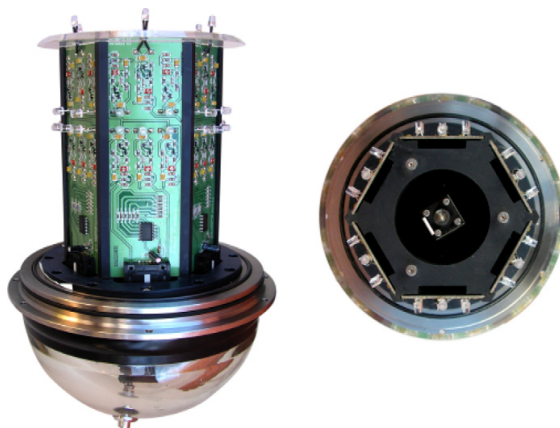


Fig. 1. An LED Beacon as viewed from sideways (left) and from the top (right). Six faces each containing six LEDs are arranged on an hexagonal cylinder. The internal photomultiplier tube is mounted at the centre of the lightguide.

collecting disc, to direct light into the photomultiplier tube. The edges of the disc were also bevelled at  $45^\circ$  to improve light collection from the horizontal LEDs.

The lower part of the LED Beacon houses the electronic boards that provide the required operating voltages and enable the actual LED flashing according to externally supplied slow control commands. Each of the six faces can be flashed independently or in combination of different faces. Within a face the top, central and the group of four LEDs can be triggered independently or in combination. This layout allows a distribution close to uniform in the azimuth angle when all the LEDs are flashing. The top LEDs allow the calibration of the OMs in those storeys on the same line above the beacon. The amount of light can be further controlled changing the number of LEDs flashing at a given time while the intensity of the LEDs can also be varied as explained in the following subsection. The possibility of flashing certain faces enables the monitoring of the uncertainty in the time calibration arising from the non-uniformity and anisotropy of the LED Beacons.

##### 5.1. The pulser system

The pulser circuit is based on an original design from Kapustinsky et al. [10] that has been modified for ANTARES to include in particular a variable capacitor that enables the synchronisation of the pulses produced by several different circuits (see Fig. 2). The trigger is provided by a 1.5 V negative square pulse of a duration of around 150 ns superimposed on a negative DC bias that can be varied from 0 to 24 V. The DC component charges the capacitor and the rising edge of the differentiated 1.5 V pulse switches on the pair of transistors, triggering the fast discharge of the 100 pF capacitor through the low impedance path that includes the LED. The parallel inductor develops charge in opposition to the discharging

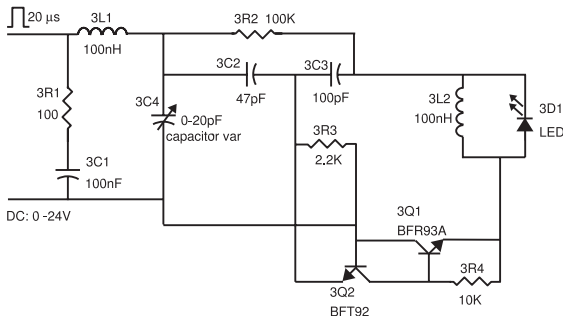


Fig. 2. Diagram of the LED pulser circuit. The variable capacitor (see text) is indicated by label 3C4.

capacitor further reducing its time constant. The level of the DC voltage determines the amount of current through the LED and thus the intensity of the emitted pulse. The layout of the printed circuit board has been designed so as to enable the inclusion of six pulsers on the same face without interference of the distributed triggering signals in the nearby pulser circuits whilst minimising the difference in the times of arrival of the trigger signal to the different pulsers. Synchronisation of the signals from different LEDs on the same or on different faces is possible by adjusting the variable capacitor in each pulser, this procedure is explained in Section 5.3. When deployed underwater the LED Beacons are operated with a typical trigger frequency of a few Hz. This frequency can be increased to rates up to 1 kHz.

### 5.2. The LEDs

Different types of LEDs were tested by the ANTARES collaboration in terms of amplitude and risetime of the emitted light pulses. The selected LED was the Agilent HLMP-CB15-RSC00 model<sup>5</sup>. This LED has a peak wavelength of 472 nm with a spectral half-width of 35 nm according to the specification sheet. The risetime of the LED pulses has been measured and found to be between 1.9 and 2.2 ns. The LEDs were classified in batches according to their risetime and the fastest (1.9–2.0 ns) are used for the top LED locations where the uncertainty in the calibration is dominated by the rise-time and not by the light propagation effects.

To increase the angular occupancy of the light emitted by the LEDs, which was originally restricted to 15°, the caps of the LEDs were machined off. The angular distribution of the emitted light for several depths of cut was measured. The cut lengths tested ranged from 1.5 to 3.5 mm. A cut at 3 mm was selected, which provides an emission flat within  $\pm 10\%$  for angles up to 35° and within a factor two up to 55°.

Fig. 3 (left) shows the light amplitude as function of the azimuth angle for different cut depths. The right plot in Fig. 3 shows the time distribution of a single LED pulse.

As mentioned in the previous subsection, the amount of energy per pulse emitted by the LED can be varied by changing the DC voltage from 0 to 24 V. Below 8 V the amount of light emitted is almost negligible. For a DC level of 24 V the energy per pulse emitted is at least 150 pJ, which corresponds to the emission of approximately  $4 \times 10^8$  photons.

### 5.3. Assembly, synchronisation, testing and integration

Once a LED Beacon is assembled, its 36 LEDs have to be synchronised by tuning the variable capacitor in each of its pulser circuits. This operation takes place in three steps. First the achievable time range of light emission is measured for each LED by adjusting the variable capacitor to its upper and lower limits. Then, taking advantage of the overlap of these time ranges, a common reference time for all LEDs is chosen. Finally, the capacitors are tuned again to reach this reference time. In the left-hand plot of Fig. 4 the different ranges for each LED pulser for a typical LED Beacon are shown. The full (red) line indicates where the synchronisation common reference time was set and the squares (blue) are the final measured times. The right-hand plot of Fig. 4 shows the distribution of the final emission times. The typical standard deviation of the emission times is in general a few tens of picoseconds. Following this synchronisation procedure, the beacon undergoes a series of thermal cycles in a climate chamber lasting 48 h in order to guarantee its stability. The emission times are then remeasured and in exceptional cases some pulsers are re-synchronised.

After synchronisation, the LED Beacon is introduced into the pressure resistant glass vessel that will house it in the sea. This is a cylindrical borosilicate glass container commercially available<sup>6</sup>. It consists of a cylinder and two end-caps (Fig. 5 left), one of them detachable. All the parts are in transparent glass except for the titanium flanges that hold the two parts together. The overall dimensions of the cylinder plus endcaps are 210 mm outer diameter and 443 mm in length. The endcap is supplied with a 22 mm diameter pre-drilled hole equipped with a penetrator on the outside of the cylinder and connecting cables on the inside. The LED Beacon is mechanically attached to the detector lines by a collar mounted on the Optical Module Frame (OMF). It is held vertically at a specific location above the triplet of OMs (see Fig. 5 right) and fixed to the structure combining the 6-fold symmetry of the beacon and the 3-fold symmetry of the OMF so as to minimise shadowing.

As already mentioned, the lines undergo a calibration procedure at the integration sites using a common laser source. The PMT of the LED Beacon is calibrated

<sup>5</sup>Agilent Technologies, Inc. Headquarters 395 Page Mill Rd. Palo Alto, CA 94306, United States.

<sup>6</sup>Nautilus Marine Service GmbH, Blumenthalstrasse 15 D-28209 Bremen, Germany.

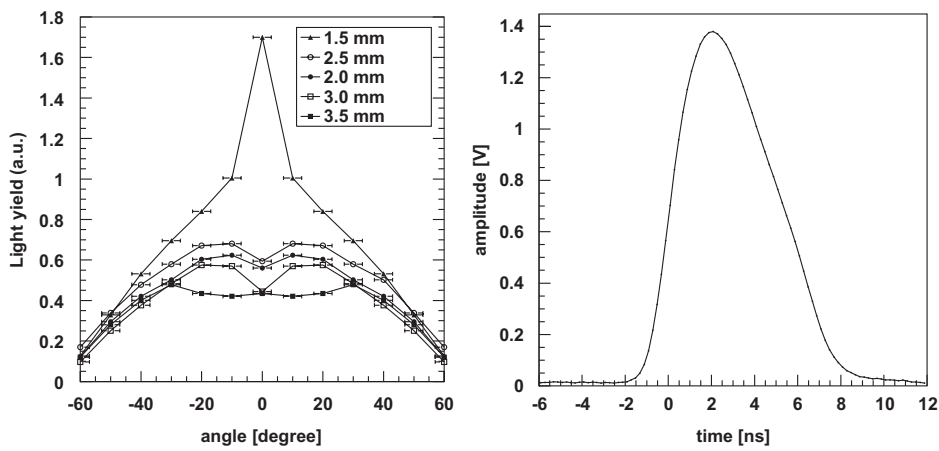


Fig. 3. Left: light amplitude as a function of the azimuth angle for different cut depths. Right: timing profile of a single LED pulse.

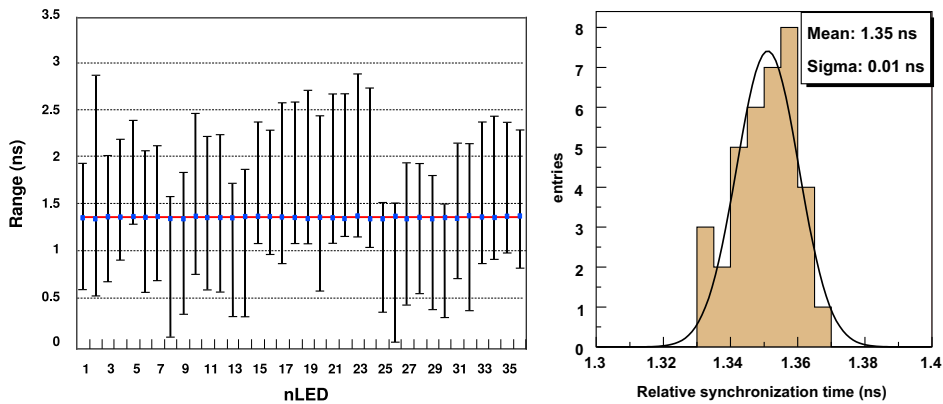


Fig. 4. Left: emission time ranges of the 36 LEDs of a typical LED Beacon. The horizontal straight line indicates the desired common emission time (reference time), the small squares show the final measured emission times. Right: distribution of the final emission times.

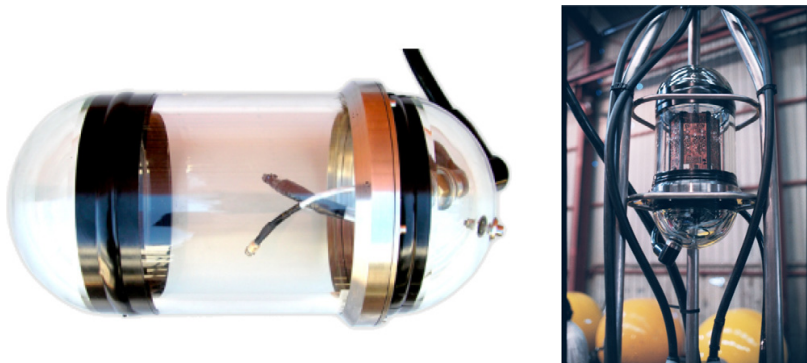


Fig. 5. Left: example of a borosilicate glass container that houses the LED Beacons. Right: LED Beacon mounted in the Optical Module Frame.



simultaneously with the PMTs in the OM's using a dedicated fibre from this common source. This calibration facilitates the measurement of their relative shift in the arrival times.

#### 5.4. Configuration, control and monitoring

The LED Beacon motherboard controls the operation of the beacon at the most basic level. Its main component is the UNIV1 card, a control board used throughout ANTARES which is based on a 17C756 PIC controller. Communication with the motherboard takes place on an RS485 serial link protocol MODBUS.

The motherboard main functions are (1) to set the DC level supplied to the LEDs (from the +48 V input voltage via DC/DC converter) and thus the intensity of the light pulses emitted, (2) to select the faces or group of faces that will be flashed, (3) to select any of the three groups of LEDs or the combination thereof that will flash, (4) to set the PMT gain control voltage, and (5) to monitor the voltage supplied to the LEDs and the ambient temperature as measured by a sensor.

The configuration of all the LED Beacons in the detector is performed through the general RunControl program [11]. Different configurations corresponding to the set of possible faces and groups of LEDs that are requested to flash and the required PMT and LED voltages, are stored in a database. In the configuration stage at the start of a calibration run, a given configuration (a *run set-up*) can then be selected and downloaded. In addition, a graphical user interface written in Java allows the expert user to communicate directly with the beacons and request their status or change their configuration during the run by generating the necessary Slow Control commands. This latter method is very rarely used during normal data taking, but is employed in the laboratory for test or debugging purposes.

### 6. The laser beacons

The Laser Beacons emit high intensity, short duration pulses of light and will be located at the bottom of a few lines, attached to their Bottom String Socket (BSS), i.e. the mechanical structure that anchors the line to the sea bed. At present, one Laser Beacon has been installed in the so-called MILOM line [2] (see next section). Fig. 6 shows a general view of the Laser Beacon and its components. The Laser Beacon points upwards so that the emitted light can reach nearby lines. Since the intensity and time profile of the light pulse are defined by the intrinsic properties of the laser, an extensive study of different laser types was made. The selected model is described in the following subsection.

#### 6.1. The laser

The main component of the Laser Beacon is a diode pumped Q-switched Nd-YAG laser which produces

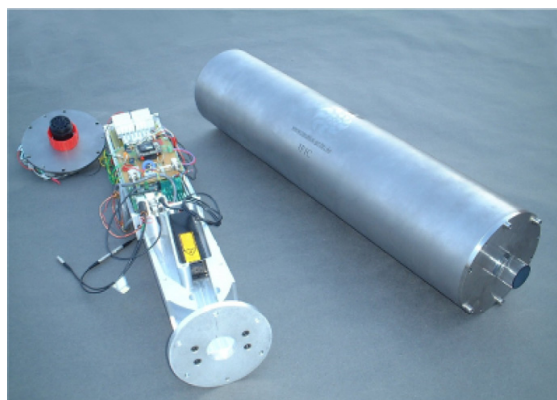


Fig. 6. A Laser Beacon dismantled: on the left the inner mechanics holding the laser head and its associated electronics; on the right the pressure-resistant titanium container that houses the equipment. On the top endplate (right part of the picture) of the container the quartz cylinder that prevents sedimentation effects can be seen.

short pulses with a time duration less than 1 ns (FWHM) and a total energy of  $\sim 1 \mu\text{J}$ . The laser model selected is the NG-10120-120<sup>7</sup> which emits at 532 nm after frequency doubling of the original Nd-YAG wavelength of 1064 nm.

The laser is very compact. Its head dimensions in mm are  $144 \times 37.4 \times 30$ . The laser can be operated in a non-triggered mode at a fixed frequency (around 15 kHz) or in a triggered mode with a variable trigger frequency. In the latter mode, which is the one being used in ANTARES, the laser is triggered when a TTL signal arrives at the device through a connection in the rear panel of the power supply. Since the laser is passively Q-switched, the delay between the trigger signal and the light pulse emission is of the order of microseconds and the pulse to pulse jitter is of the order of a few hundred nanoseconds. The actual time of laser emission is obtained thanks to a fast photodiode integrated into the laser head.

Once the laser shot is produced, the built-in photodiode sends back a signal which is passed to an ARS chip located in the String Control Module (SCM), the electronics container similar to the LCM located on the BSS. The current that feeds the pumping diode is switched off and the system waits for the next trigger signal.

The power supply delivered with the laser was refurbished in order to comply with the technical requirements of the experiment and, at the same time, to accommodate the whole apparatus into a smaller space. The signal from the photodiode is reshaped electronically to fulfil the constraints imposed by the front-end electronics of the experiment.

<sup>7</sup>Nanolase, presently part of JDS Uniphase Corp., 430 N. McCarthy Blvd. Milpitas, CA 95035, United States.

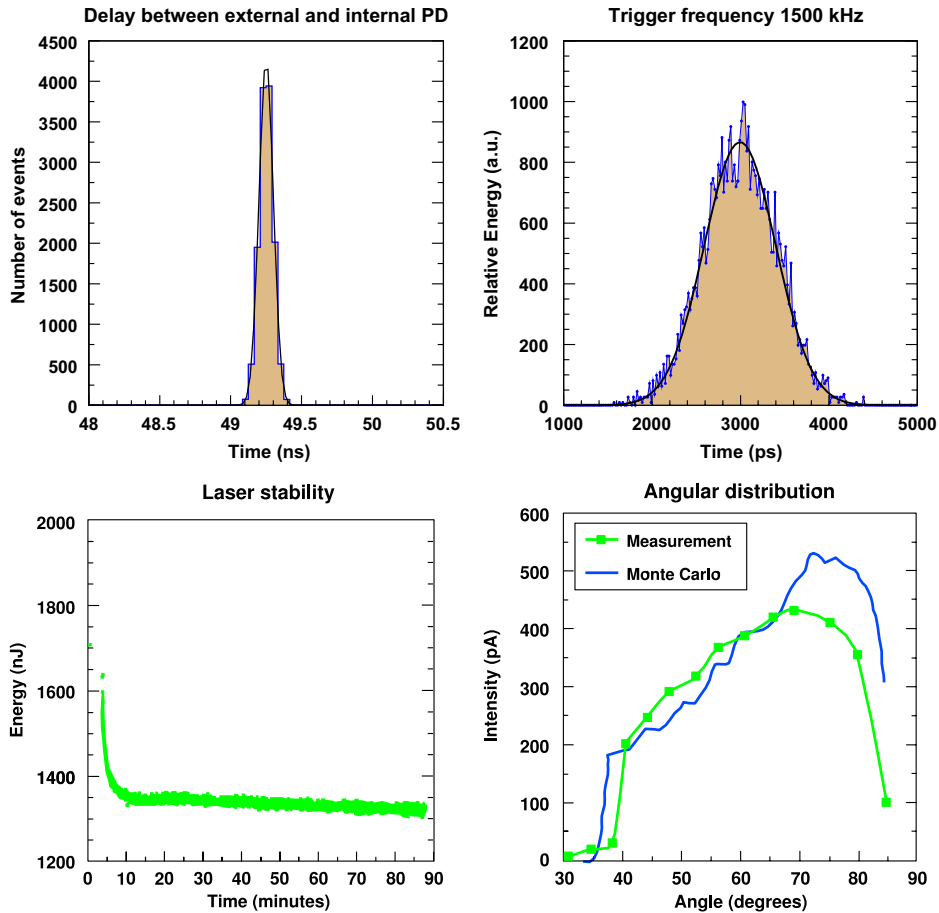


Fig. 7. Top-left: distribution of the difference of the time of emission of the laser pulse as measured by an external Newport 818-BB-20 photodiode (PD) and the laser built-in photodiode. Top-right: timing profile of the laser pulse as measured by a Hamamatsu streak camera. Bottom-left: energy of the laser as a function of time after switch-on. Bottom-right: angular distribution of the Laser Beacon in water and comparison with Monte Carlo predictions (see Section 6.2).

In order to characterise the relevant features of the Nd-YAG laser, a thorough study of the main laser parameters was made:

- (1) The intrinsic jitter of the Q-switching mechanism gives rise to a jitter in the laser pulse emission time of a few hundred nanoseconds. It was, therefore, necessary to confirm that the time recorded by the internal photodiode was sufficiently accurate for our needs. Several fast external photodiodes (Newport 818-BB-20, Alpha-las UPD-200-SP, Hamamatsu S5973-01) were employed to estimate the accuracy in the emission time given by the internal photodiode. Fig. 7 (top-left) illustrates the difference in emission time as measured by an external Newport 818-BB-20 photodiode and the internal built-in photodiode. The standard deviation of the distribution is 50 ps (the position of the peak is

immaterial, it depends on delays that will be determined by calibration).

- (2) The pulse shape was measured using a Hamamatsu streak camera. In Fig. 7 (top-right) an example of a pulse of the laser as sampled by the streak camera (5 ps resolution) is shown. The FWHM of the pulse is determined to be smaller than 0.8 ns. The time shape profile is smooth and not far from Gaussian. As expected, the timing features of the pulse did not change with the three trigger frequencies studied, namely 100 Hz, 1.5 kHz and 10 kHz.
- (3) Different energy measurements were also performed with a special device<sup>8</sup> capable of measuring the energy

<sup>8</sup>A photodiode head Model PD10 and a laser power meter LaserStar from Ophir, Laser Measurement Group Ophir Optonics Inc. 260-A Fordham Road Wilmington, MA 01887, United States.

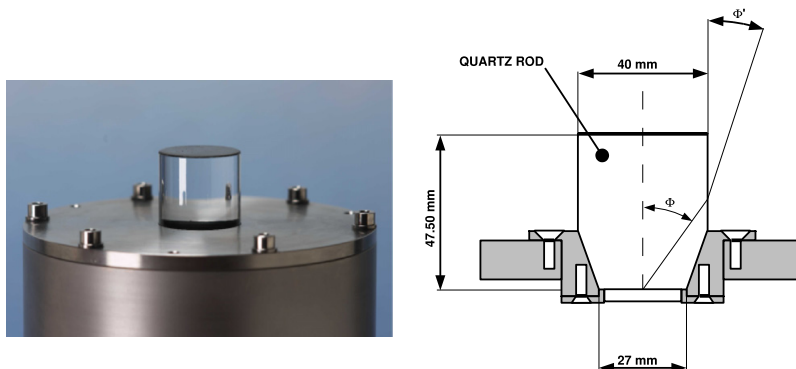


Fig. 8. Left: upper endplate of the Laser Beacon container with the quartz cylinder used to avoid losses due to biofouling. Right: schematic path of the outgoing light.

of each pulse. As can be seen in Fig. 7 (bottom-left), after a warm-up period of  $\sim 5$  min, the energy yield per pulse (close to  $1.3 \mu\text{J}$ ) becomes stable ( $< \pm 3\%$ ).

## 6.2. The laser beacon mounting

The laser is housed in a cylindrical titanium container 705 mm in length and 170 mm in diameter (see Fig. 6). The bottom endcap holds the penetrator of the cable connectors. Inside the container, an aluminium inner frame holds the laser and its associated electronics. The laser beam points upwards and leaves the container through an opening in the top end-cap. In this opening there is an optical diffuser comprising a flat disk diffuser<sup>9</sup> with a thickness of 2.2 mm and a diameter of 25 mm that spreads light beam out following a cosine distribution, so that the light can reach the surrounding lines.

In order to minimise transmission losses due to under-water sedimentation and biofouling<sup>10</sup> (the laser is more affected by this effect since it is pointing upwards), a quartz cylinder was bonded to the upper surface of the diffuser as can be seen in Fig. 8 (left). The upper surface of this cylinder is coated with a black, water resistant epoxy layer. The light then leaves the cylinder through the vertical wall where biofouling is negligible (see scheme in Fig. 8 (right)). Due to Snell's law, the cosine distribution is conserved when the light leaves the cylinder through its vertical wall.

The dimensions of the cylinder were chosen to be 40 mm in diameter and 47 mm in length. These dimensions, which together with the refractive index of quartz ( $n = 1.54$ ) and water ( $n = 1.34$ ) determine the maximum and minimum angle of the outgoing light, were selected to maximise the number of storeys illuminated in the closest lines, while taking into account the technical constraints of the cylinder fixing due to the high pressure.

<sup>9</sup>ORIEL model 48010, Newport Corporation-Oriel 150 Long Beach Blvd. Stratford, CT 06615, United States.

<sup>10</sup>The accumulation of micro-organisms, mostly bacteria, on outer surfaces and fallen sediment subsequently adhering to surfaces [8].

The distribution of the outgoing light was measured by immersing the Laser Beacon into a large water tank that had a PMT on its upper cover and inclining the beacon at different angles with respect to the vertical. In Fig. 7 (bottom right) the resulting angular distribution is shown together with the result of a simulation. As can be seen, they are in quite good agreement except for high angles, where there are edge effects due to a bevel in the quartz cylinder not reproduced by the Monte Carlo.

The laser diode is fed with 5 V and 750 mA supply. As in the case of the LED Beacon, a UNIV1 micro-controller board is used to provide the correct power supply parameters, execute the corresponding switch on and off signals and monitor the measurements given by temperature and humidity sensors inside the container. A thermo-electrical cooling system based on Peltier cells ensures the correct operating temperature of the laser head.

## 7. First results of the optical beacon system

An instrumentation line with Optical Modules (MILOM) [2] and the first two complete lines of the detector, *Line 1* and *Line 2*, were already in operation at the ANTARES site at the end of 2006. The three lines are connected to a Junction Box which in turn is linked to the shore by an electro-optical cable. The lines are operated from a control room situated at La Seyne-sur-Mer, near Toulon (France), and data are regularly taken since their connection.

The MILOM has one operating LED Beacon at storey 1 and one Laser Beacon located at the bottom of the line. *Lines 1* and *2* are equipped with four LED Beacons at storeys 2, 9, 15 and 21 (numbered from bottom to top). Dedicated data taking runs in which one or several of the Optical Beacons are flashed are regularly performed. Only data from the Optical Beacon system in *Line 1* and MILOM are presented here.

Light emitted from the various Optical Beacons is detected by the OM's on the two lines. The distribution of the arrival times of the light at the OM's is presented below. Further details of this analysis will be the subject of a



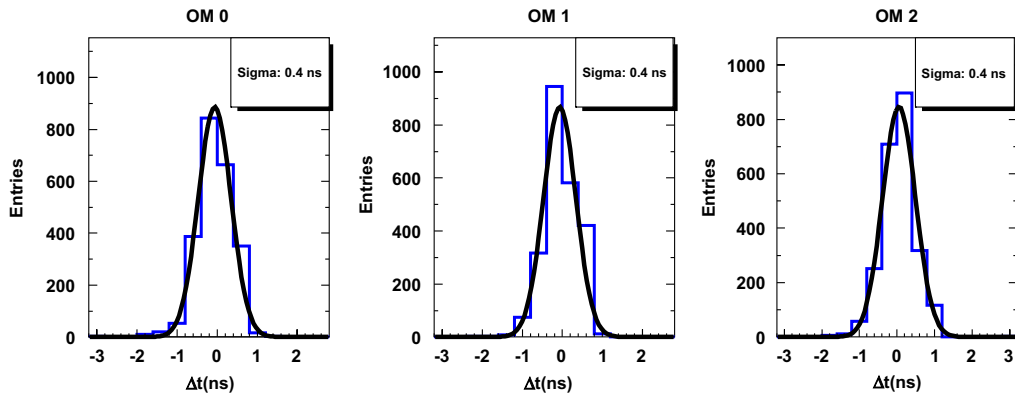


Fig. 9. Distributions of the difference between the time of arrival of the light at the three OMs of storey 3 of *Line 1* and the time of emission from the LED Beacon in storey 2 on the same line.

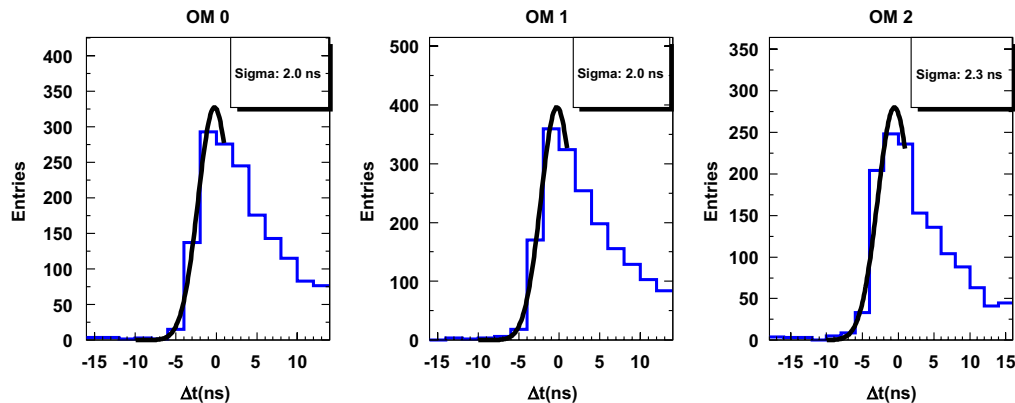


Fig. 10. Distributions of the difference between the arrival time of light at the three OMs of storey 2 of the MILOM and the emission time from the Laser Beacon at the bottom of the same line.

subsequent paper, where the optical properties of the water (attenuation and scattering) will be also treated together with the results obtained combining the positioning system.

Fig. 9 shows the distribution of the difference between the time of the signal recorded by each of the three OMs on the third storey of *Line 1* and the time of emission of the pulse at the LED Beacon in the storey below as recorded by the beacon's PMT. Together with the time distributions, a Gaussian fit is shown. The values of the Gaussian width are also indicated. The means have been set to zero. The relatively large bin size has been selected to average out the difference in width of the ARS time bins (the so-called differential non-linearity) whose calculation and correction will not be treated here.

Due to the short distance between the beacon and the OMs ( $\sim 13.4$  m) and to the high intensity at which the beacon was operated, contributions to the width of the time distributions from the transit time spread in the PMT, from the signal pulse walk, from light scattering in the water and from line movements are all negligible. The

width of the time distribution, which is  $\sim 0.4$  ns, is therefore a measure of the resolution of the read-out electronics which is compatible with the time resolution measured in reference [5].

Fig. 10 shows the distributions of the difference between the detection time of the signal at the three OMs of the second storey of the MILOM and the emission time of the pulse from the Laser Beacon as provided by the built-in photodiode. In this case, due to the distance between the Laser Beacon and the OMs ( $\sim 109$  m) a long tail due to scattering is clearly visible. The averaged number of photoelectrons (pe) recorded at the PMTs in this case is about 2 pe. The sigmas of a Gaussian fit to the rising edge of the distributions are shown. The rise-time of the distributions is the outcome of the convolution of the rise-time of the laser pulse itself and the effect of scattering on the early photons. No correction has been applied to the data. The position of the peaks of the distributions have been set to zero.

The Optical Beacon system is also used for time calibration between different lines. Fig. 11 shows the

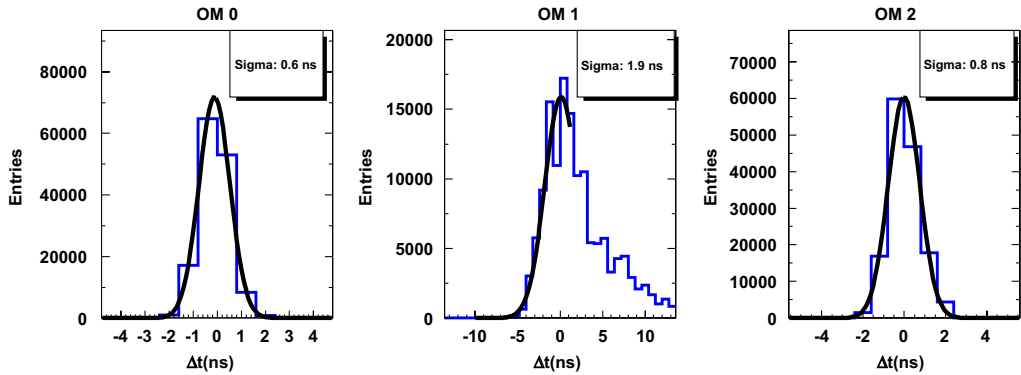


Fig. 11. Distributions of the difference between the arrival time of the light at the three OMs in *Line 1* storey 3 and the emission time from the LED Beacon in the first storey of the MILOM.

distribution of the difference between the detection time of the signal at the OMs in *Line 1* third floor and the emission time of the light by the LED Beacon located in the MILOM first storey. The distance between the triplet and the Optical Beacon is about 80 m. Due to the orientation of the triplet in the storey, one of the OMs looks in the opposite direction to the MILOM and therefore can only detect scattered photons which explains the tail in the time distribution. The results of the Gaussian fits to the full distributions, or its rising edge when scattering is present, are shown.

## 8. Summary and conclusions

In order to ensure the high angular resolution that is aimed by ANTARES, an exhaustive R&D study to develop different time calibration systems has been carried out. These systems must guarantee a relative time resolution at the sub-nanosecond level between the Optical Modules of the detector. In this article the main features of the Optical Beacon calibration system of the ANTARES detector have been described. This system uses short light pulses produced by LEDs or lasers to measure time differences and therefore calibrate the timing of the detector. The design and construction of these Optical Beacons together with the tests performed in the laboratory have been described. The first results of some of these devices located at 2500 m depth have been given. With these calibration systems it has been demonstrated that, in situ, ANTARES achieves a sub-nanosecond time resolution.

## Acknowledgements

The authors acknowledge the financial support of the funding agencies: Centre National de la Recherche

Scientifique (CNRS), Commissariat à l'Énergie Atomique (CEA), Commission Européenne (FEDER fund and Marie Curie Program), Région Alsace (contrat CPER), Région Provence-Alpes-Côte d'Azur, Département du Var and Ville de La Seyne-sur-Mer, in France; Bundesministerium für Bildung und Forschung (BMBF), in Germany; Istituto Nazionale di Fisica Nucleare (INFN), in Italy; Stichting voor Fundamenteel Onderzoek der Materie (FOM), Nederlandse organisatie voor Wetenschappelijk Onderzoek (NWO), in The Netherlands; Russian Foundation for Basic Research (RFBR), in Russia; Particle Physics and Astronomy Research Council (PPARC), in U.K.; National Authority for Scientific Research (ANCS) in Romania; Ministerio de Educación y Ciencia (MEC), in Spain.

## References

- [1] E. Aslanides, et al., The ANTARES proposal, 1999, astro-ph/9907432. (<http://antares.in2p3.fr>).
- [2] J.A. Aguilar, et al., ANTARES Collaboration, *Astro. Phys.* 26 (2006) 314.
- [3] P. Amram, et al., ANTARES Collaboration, *Nucl. Instr. and Meth. A* 484 (2002) 369.
- [4] J.A. Aguilar, et al., ANTARES Collaboration, *Nucl. Instr. and Meth. A* 555 (2005) 132.
- [5] F. Feinstein, ANTARES Collaboration, *Nucl. Instr. and Meth. A* 504 (2003) 258.
- [6] J.A. Aguilar, et al., ANTARES Collaboration, *Astro. Phys.* 23 (2005) 131.
- [7] A. Romeyer, Étude de la sensibilité du détecteur ANTARES à un flux diffus de neutrinos cosmiques de haute énergie, Thesis in Université Denis Diderot - Paris VII. (<http://antares.in2p3.fr/Publications/thesis/2003/Alain-Romeyer-phd.pdf>).
- [8] P. Amram, et al., ANTARES Collaboration, *Astro. Phys.* 19 (2003) 253.
- [9] T. Fields, D. Jankowski, *Nucl. Instr. and Meth.* 215 (1983) 131.
- [10] J.S. Kapustinsky, et al., *Nucl. Instr. and Meth. Phys. Res. A* 241 (1985) 612.
- [11] J.A. Aguilar, et al., ANTARES Collaboration, *Nucl. Instr. and Meth. Phys. Res. A* 570 (2007) 107.

## 5.2 Development of a new Laser Beacon for Time calibration in the ANTARES Neutrino Telescope

Este artículo, titulado “Development of a new Laser Beacon for Time calibration in the ANTARES Neutrino Telescope”, se presentó en el congreso ADHOC de 2011 en Valencia, siendo seleccionado para su publicación en la revista “Proceedings - 8th IEEE International Conference on Mobile Ad-hoc and Sensor Systems, MASS 2011” en octubre de 2011. En esta revista todos los artículos son revisados por pares. Según la última edición publicada del Scimago Journal Ranking (2014) esta revista tenía un índice SJR de 0,401 en el apartado “Control and Systems Engineering”.

El artículo describe el diseño, testeo e integración el último modelo de *laser beacon* diseñado para ANTARES, con el objeto de medir y monitorizar los *offsets* de tiempo relativo entre los fotomultiplicadores del telescopio. Este modelo de *laser beacon* incluye como novedad un atenuador óptico controlable por tensión que permite modificar la intensidad del pulso de luz emitido de forma remota. Esta posibilidad aumenta las prestaciones del *laser beacon*.

## Development of a new Laser Beacon for Time calibration in the ANTARES Neutrino Telescope

Emanuele, Umberto; Real, Diego<sup>\*</sup>; Urbano, Fernando; Zornoza, Juan de Dios; Zúñiga, Juan

IFIC – Instituto de Física Corpuscular, Edificios Investigación de Paterna

CSIC – Universitat de València

Apdo. de Correos 22085, 46071 Valencia, Spain

**Abstract**— The ANTARES collaboration has built a deep sea neutrino telescope in the Mediterranean Sea consisting of a matrix of pressure resistant glass spheres holding large area photomultipliers. The aim of the telescope is to observe cosmic neutrinos through the Cerenkov light induced in sea water by charged particles produced in neutrino interactions with the surrounding medium. A relative time calibration between photomultipliers of the order of 1 ns is required to achieve an optimal performance. To this end, several time calibration subsystems have been developed for the whole telescope. In this article, the design, tests and integration of the last Laser Beacon model, developed to measure and monitor the relative time offsets between photomultipliers, are described.

**Keywords:** *Deep Sea Instrumentation, Time Calibration Device, Neutrino Telescope, Laser Beacon.*

### I. INTRODUCTION

The ANTARES telescope is a deep sea neutrino detector that has been deployed in the Mediterranean Sea at a depth of 2475 m offshore from Toulon (France). It was completed in 2008 and since then, is taking data smoothly being at present the largest neutrino telescope in the Northern hemisphere and the first to operate in the deep sea [1]. The telescope has been designed to detect extraterrestrial neutrinos with energies above 10 GeV by means of the Cerenkov photons induced by the passage of relativistic charged particles through the sea water. When a neutrino interacts in the material surrounding the detector, it can produce a subatomic particle called muon which travels across the detector at a speed greater than the speed of light in water. Such a particle generates a faint blue luminescence called Cerenkov radiation. The arrival times of the light collected by optical detectors disposed in a three dimensional array can be used to reconstruct the muon trajectory, and consequently that of the neutrino, which is strongly correlated. The main elements of a neutrino telescope are therefore the sensitive optical detectors, usually photomultiplier tubes (PMTs) [2], which collect this light and transform it into electronic signals.

The ANTARES detector is equipped with 885 10-inch PMTs (model Hamamatsu R7081-20) which are housed in water-pressure resistant glass spheres (optical modules, OMs) and coupled with optical gel to its inner surface. A  $\mu$ -metal cage inside the OM protects the PMT from the Earth magnetic field [3]. The OMs are distributed in 12 lines 450 m long, anchored to the sea bottom by a dead weight and held

vertically by a buoy at the top. The horizontal distance between lines is 60-70 m. Each line contains 25 storeys separated every 14.5 m being the first one at a distance of 100 m from the seabed. Each storey comprises a triplet of OMs and a pressure resistant titanium container housing all the electronics for the three OMs, making up the so-called Local Control Module (LCM). Each OM is read out by an electronics board housed in the LCM carrying a pair of Analogue Ring Samplers (ARS), the ASIC chip used for signal processing and digitization [4]. Five consecutive storeys along the line are grouped into a sector. One LCM of a sector (Master Local Control Module, MLCM) allows data connection from the sector to shore along optical fibers. At the bottom of each line, a String Control Module (SCM) houses the power units. The lines are connected to a junction box (JB) from where the Main Electro-Optical Cable (MEOC), of a length of 45 km, links the detector to the shore station. The shore station houses a computer farm for data filtering and storage. In addition, the detector is completed by an Instrumented Line (IL) which holds several instruments to perform environmental measurements [1]. Lines can be recovered releasing the dead weight of the anchor by issuing an acoustic command from a ship on the sea surface.

The angular resolution of the reconstructed track depends on the accurate measurement of the arrival time of Cerenkov photons reaching the photon sensors. Good time and position calibration of the detector is therefore of utmost importance to achieve a good angular resolution. Water-based neutrino telescopes have intrinsic and unavoidable limitations in the time precision as the chromatic dispersion and scattering of light in water ( $\sigma \sim 2$  ns for a travelling distance of 50 m), and the combined effect of the photomultiplier transit time spread and electronics ( $\sigma \sim 1.5$  ns). Taking into account these intrinsic limitations, the required precision of a time calibration system to measure the relative time between photo-sensors should be  $\sigma \leq 1$  ns. Pulse light emitters (beacons) [5] have been successfully used in ANTARES to measure in-situ relative time offsets between OMs [6]. LEDs (Light Emission Diodes) and lasers located throughout the detector produce short duration and powerful light pulses which are detected by the photo-sensors, allowing the measurement of the time delay between the arrival of the photon to the photocathode and the time stamping in the front-end electronics. In particular, each detection line in ANTARES incorporates four LED Optical Beacons (LOBs) used for time calibration and studies of the optical properties

<sup>\*</sup>Corresponding autor: real@ific.uv.es

of the sea water. The main objective to achieve with the LOBs is to perform time calibration in the same line (intraline calibration) where the LOBs are installed. Furthermore, two Laser Beacons (LB) were also deployed in ANTARES to perform relative time calibration between lines (interline calibration) [5]; the first one was deployed in 2005 with the Mini Instrumentation Line equipped with Optical Modules, the so-called MILOM [7]. This line was recovered in 2007 and the LB was upgraded with the addition of a voltage-controlled attenuator. The laser was redeployed in the bottom of the Line 8 and it has been working successfully since then. Line 7 was deployed also including another LB but unfortunately, it has been impossible to operate it due to a power failure.

Taking profit of the recovery of the IL in the spring of the present year, the deployment of a new version of the LB with a more powerful laser and a new design was proposed. The deployment of this new LB not only is completing ANTARES with a full time calibration optical system (two LB fully operational) but also it is important for testing and developing new calibration devices for km<sup>3</sup>-scale undersea neutrino telescopes as the future deep-sea research infrastructure KM3NeT, which is presently in its preparatory phase. Thus, the following issues related to the LB will be tested: the resistance of the LB container to the pressure; the measurement of the light range, the communications between the main control board and the light emitting source and the reliability of the electronics in general. A brief description of this new LB and its main components is given in section 2. The laser source is described in section 3. A brief account of the mechanics is provided in section 4. The LB anti-biofouling system is described in section 5. Section 6 reviews the voltage-controlled optical attenuator used to adjust the laser beam intensity. In section 7 the LB electronics including control of the internal photodiode signal is explained, the slow control interface is described in section 8. Finally a summary is given in section 9.

## II. THE LASER BEACON

The Laser Beacon (LB) consists of a cylindrical titanium container (see Fig. 1) housing inside a diode pumped Q-switched Nd-YAG laser. A voltage-controlled optical attenuator consisting in a liquid crystal retarder and a linear polarizing beam-splitter cube allows the change of the light intensity emitted by the laser. The laser, the voltage-controlled optical attenuator and their associated electronics are mounted inside the container in an aluminum frame. The laser beam leaves the container through an opening in the top end-cap. This opening is equipped with an anti-biofouling system consisting of a flat disk diffuser that spreads the light beam out following a Lambertian distribution and a quartz rod cylinder bonded to the upper surface of the diffuser. The light leaves the cylinder through its vertical wall where biofouling is negligible. The bottom end-cap of the titanium container holds a penetrator for the power supply and the external communications. Inside the container an Acoustic Positioning System that includes the control of one external hydrophone is installed but this topic is not covered by the present article [8].



Figure 1. Laser Beacon once completely mounted.

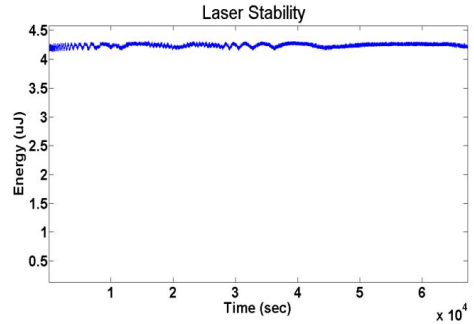


Figure 2. Laser energy as a function of time. In total 20 hours of laser operation.

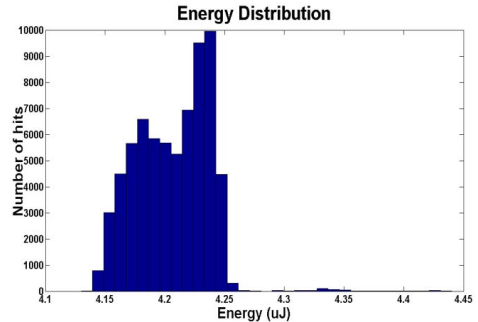


Figure 3. Energy distribution obtained during 20 hour of laser operation.

## III. THE LASER SOURCE

The main component of the Laser Beacon is a diode pumped Q-switched Nd-YAG laser which produces short pulses with time duration of  $\sim 400$  ps (FWHM) and a total energy of about  $3.5 \mu\text{J}$  (Data given by the manufacturer,  $4.15\text{--}4.25 \mu\text{J}$  measured). The laser to be used is the model STG-03E-1S0 from Teemphotonics which emits light with a wavelength of  $532$  nm after doubling original Nd-YAG wavelength of  $1064$  nm. The main technical characteristics of the laser are shown in Table I. Q-switching allows the production of a pulsed beam of light.

This technique yields light pulses with very high power, much higher than would be obtained by the same laser operating in a constant output (continuous wave) mode. Compared to other techniques for pulse generation with

TABLE I  
LASER PROPERTIES

Parameter	Value
Pulse width (ns)	400
Energy / Pulse ( $\mu\text{J}$ )	3.5
Peak Power (kW)	10
Repetition rate (kHz)	0.01 ...2
Average Power (mW)	$\leq 7$

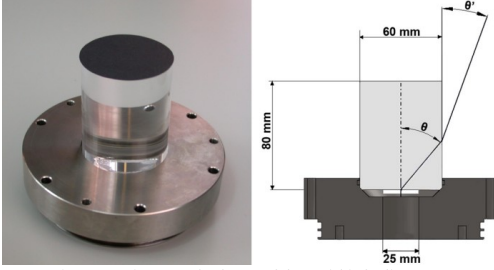


Figure 4. Picture and scheme of the anti-biofouling system

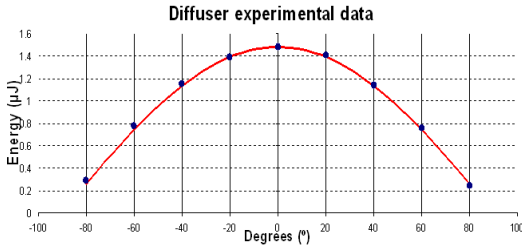


Figure 5. Experimental values of the laser light energy measured after the 48010 diffuser (dots). The red line presents de lambertian distribution.

lasers, Q-switching allows for lower pulse repetition rates, higher pulse energies, and longer pulse durations. The model of laser used is 2.7 more powerful (3.5  $\mu\text{J}$ /1.3  $\mu\text{J}$ ) than the laser head used previously in ANTARES [5]. The laser pulse rate can be fixed between 100 Hz and 2000 Hz.

#### A. Energy measurements

Different energy measurements have been performed with a laser photodiode head model PD10 and a powermeter LaserStar from Ophir. The system is able to measure the energy of individual pulses. The precision of such a device is better than 1 nJ. Fig. 2 shows the energy per pulse during the first 20 hours after switch-on and operating with a trigger frequency of 1 kHz. The energy distribution is shown in Fig. 3. As can be seen, the energy yield is very stable ( $\leq \pm 2\%$ ).

### IV. MECHANICS

The main mechanical element of the laser beacon is the titanium container holding the laser, the optical attenuator and the associated electronics. It consists of a cylinder of 542 mm high with a diameter of 142 mm made of titanium

grade 5 (Ti6Al4V). The container is composed of three different pieces:

- the cylindrical tube
- the lower cap (connector cap)
- the upper cap with the anti-biofouling system

The container has been designed to resist up to 5000 meters deep. Finite Elements Method analysis has been used for assessing the viability of the container at such high pressures first. Finally, it has been tested in a hyperbaric chamber to 400 bars.

#### A. Inner aluminum mechanics

The inner aluminum mechanics provides the structure where the different devices of the laser beacon are integrated. It consists of two aluminum rings joined together by two aluminum beams. One of the rings is screwed to the upper titanium end-cap.

#### B. Connector

A titanium grade 5 connector from the company MacArtney, the BH12F, has been used to input and output the required LB signals. The connection between the LB and the Bottom String Structure (BSS) is done with a submarine cable of the same company. Table II and Fig. 6 give the details of the LB wiring.

### V. THE ANTI-BIOFOULING SYSTEM

As already mentioned, the laser beam goes out upwards through an anti-biofouling system made by a diffuser disk and a quartz cylinder rod (see Fig. 4). The laser beam points to the optical disk that spreads light out following a cosine distribution. The diffuser disk is glued to the lower surface of the quartz cylinder rod.

#### A. Disk diffuser

The disk diffuser is a model 48010 from ORIEL (Flashed opal diffuser) with a thickness of 2.2 mm and a diameter of 25 mm. The theoretical distribution of this type of diffuser follows a Lambertian distribution. In the inner mechanics, the laser is slightly deviated with respect to the vertical direction in order to prevent damages from its own reflected beam. Measurements in the laboratory have shown that this small tilt has no effect on the outgoing light distribution. In Fig. 5 the measured angular distribution coming out from the diffuser disk is shown. The energy has been measured using a Newport optical meter 1835-C.

#### B. Cylinder Quartz rod

The cylinder quartz rod is made of pressure-resistant quartz with a refractive index of 1.4585. It has been manufactured by Technical Glass Products, Inc. The dimensions of the quartz cylinder have been chosen to be 60 mm in diameter and 80 mm in length and will be inserted 10 mm into the upper titanium cap. These dimensions together with the refractive index of quartz and water, determine the maximum and minimum angle of the outgoing light. With this design, it is possible to illuminate photo-sensors located at a horizontal distance of 200 m and 50 m above the seabed.

## VI. THE VOLTAGE-CONTROLLED OPTICAL ATTENUATOR

Unlike LED sources, where light intensity can be varied changing the voltage applied [5], the amount of light emitted by the laser is fixed. In order to allow light intensity tuning in the LB, a voltage-controlled optical attenuator using a liquid crystal variable retarder located in the beam path has been used. Liquid crystal variable retarders consist of a thin crystal liquid layer placed into a small cavity made of parallel fused silica. The anisotropy of the liquid crystal molecules causes its birefringence. When a voltage is applied the molecules align parallel to the electric field. The higher the voltage, the lower the birefringence and the delay of the optical phase are. This allows the electrical tuning of a linearly polarized beam. Since the light from the laser is linearly polarized, the attenuation can be achieved by the combination of a liquid crystal variable retarder and a linear polarizer. The liquid crystal head is the retarder model LVR-100- 532 from Meadowlark Optics. The polarizer used is a broadband polarizing cube beam-splitter from Newport, model 05FC16PB.3, together with his holder, model CH-0.5. The beam-splitter cube consists of two right-angle prisms where the hypotenuse of one of the prisms is coated with a multilayer dielectric polarizing beam-splitter. The incoming beam is divided into two orthogonal, linearly polarized components in such a way that p-polarized light is transmitted while s-polarized light is reflected. The used model is optimized to work in the 420 to 680 nm range. The reason to use a beam-splitting polarizing cube is that it presents a higher damage threshold to laser exposure than that of a standard linear polarizer. A schematic view of the final configuration can be seen in Fig. 7.

### A. Transmission measurements

Fig. 8 shows the curve laser energy transmission versus peak to peak voltage of the 2 kHz square signal applied to control the optical attenuator. In this case the energy measurements have been carried out with the already mentioned power meter (LaserStar).

## VII. ELECTRONICS

The main electronics components used in the Laser Beacon are:

- The Laser power supply. It consists in three DC/DC converters capable to yield the high current peaks during the warm up of the laser. The input voltage to the board is 48 V that are supplied through the pins 6 and 7 of the connector (see TABLE II). The output voltages provided by this power supply are three:
  - + 12 V and 0 V: to supply the laser (DC/DC #1). The total power of this DC/DC is 15 W
  - + 5 V and 0 V: to supply the rest of electronic boards (DC/DC #2). The total power is 1 W
  - + 12 V and -12 V: to supply the optical attenuator control board (DC/DC #3). The total power of this DC/DC is 1 W
- Electronic control board with a dsPic 33FS256MC710 microcontroller [8]. It manages the Modbus [9] and I<sup>2</sup>C [10] communications and controls directly the laser frequency and the trigger selection (internal or external).

TABLE II  
WIRING OF THE LB

Wires	Description
9 and 10	Trigger
4 and 5	RS-485
11 and 12	Photodiode signal
6 and 7	Power supply
2 and 3	Not used
1 and 8	Shielding

Wiring diagram

Figure 6. Wiring of the LB.

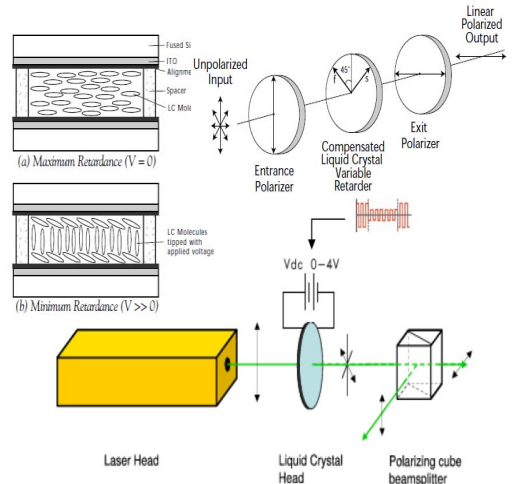


Figure 7. Scheme of the voltage-controller optical attenuator.

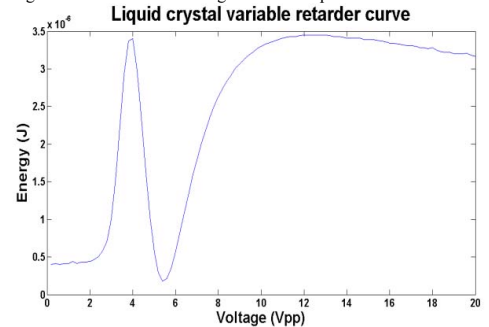


Figure 8. The energy values versus the voltage applied to the voltage-controlled optical attenuator.



- Electronic board to control the optical attenuator. It is supplied with the third DC/DC and provides the electronic signal required by the liquid crystal retarder. The control of the optical attenuator is performed through a square signal of 2 kHz. The level of attenuation is obtained by changing the amplitude of the signal. The maximum amplitude peak to peak is 20 V (10 V to -10 V). The attenuation of the attenuator is not linear (see Fig. 8). The control of the attenuator is done by means of an I<sup>2</sup>C DAC.
- Electronic card for the on/off control of the laser. This board provides the corresponding TTL signals to switch on/off the laser. The switch on/off of the laser is controlled by a second I<sup>2</sup>C DAC.
- Electronic card of the laser control (MLC-03A-MP0). Provided by Teemphotronics. It receives the on/off signal and the trigger signal.
- Electronic board for conditioning the photodiode signal. This signal comes directly from the laser head and it is attenuated and inverted.
- Electronic board for adapting the trigger arriving from the BSS (external trigger). To adapt the trigger signal a transistor in open collector is used. The adapted trigger is read by the microcontroller.

#### A. The Photodiode Signal

The laser head has a built-in photodiode that provides the exact time of the laser light emission. The photodiode signal is a positive signal with a rise time of 22 nanoseconds and an amplitude of 5 V (positive).

The intrinsic jitter of the Q-switch mechanism gives a jitter in the laser pulse emission time of a few hundred nanoseconds. It is therefore necessary to confirm that the time recorded by the internal photodiode is accurate enough to perform sub-nanosecond time calibration. The read-out system to acquire the photodiode signal of the laser is not located in the laser container but in the BBS where the LB is connected.

The signal coming from the photodiode is adapted (inverted and attenuated by means of a transformer mounted in a ferrite toroidal core) and sent to the BSS read-out system. The fall time of the signal after the transformer is 42 ns with an amplitude of -3 V (negative).

The jitter of the internal photodiode (after being attenuated and inverted) has been measured using an external photodiode (Newport 812-20 photodiode with a rise time lower than 200 ps) directly illuminated by the laser beam. The FWHM of the measured jitter, shown in Fig. 10, is lower than 550 ps.

#### VIII. SLOW CONTROL

The LB is not autonomous and has to be commanded from outside. There are several functions that must be controlled. These LB functions are controlled via the RS-485 Modbus protocol. The LB implements one I<sup>2</sup>C slaves with two DACs. The Modbus commands (sent by Run Control [4]) are received by the dsPic 33FS256MC710 microcontroller that implements a Modbus slave. This microcontroller also implements an I<sup>2</sup>C master that controls the LB I<sup>2</sup>C slave. The first I<sup>2</sup>C DAC controls the liquid crystal variable

retarder. The I<sup>2</sup>C command sets a voltage between 0 V and 5 V that is converted to a 2kHz square signal with the amplitude voltage varying to control the optical attenuator. 5 V of the DAQ corresponds to an amplitude of -10 and 10 V of the square signal (20 V peak to peak) and 0 V of the DAQ correspond to 0 V peak to peak. This relation is linear.

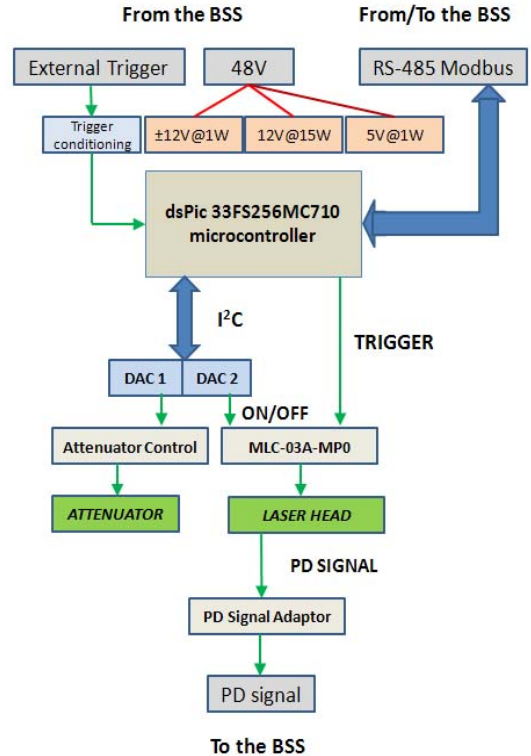


Figure 9. Schemes of the electronic system.

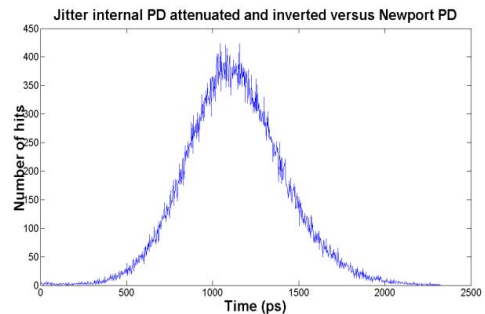


Figure 10. Distribution of the difference of the time emission of the laser pulse as measured by an external photodiode and the laser built-in photodiode.



The second I<sup>2</sup>C DAC controls the laser switch ON-OFF. The laser is switched ON only during calibration runs (periods of several minutes). It remains switched OFF the rest of the time.

The trigger type (internal or external), the frequency of flashing and the level of attenuation are configured in the LASER\_BEACON\_CONFIG2 table of the ANTARES Oracle Database. This table is read by the run control, the Modbus commands are created and sent to the LB via the BSS [4] that implements a Modbus master. The Modbus commands are received by the LB microcontroller that acts according to the specified protocol, activating the LB, fixing the polarization value of the attenuator, the trigger type to use and the frequency rate of the laser.

The first step is to supply the 48 V to the laser. This voltage is supplied by the BBS. When the container is powered up the I<sup>2</sup>C commands control the intensity of emission. The frequency rate and the selection between the internal and the external trigger are controlled directly by the microcontroller. It uses one of the digital outputs to send to the laser the trigger signal. If the internal trigger is chosen the microcontroller generates the trigger signal. Instead when the external trigger is chosen the external trigger coming from the BSS is read by the microcontroller and a trigger signal is generated with the same frequency as the external trigger.

The commands and the sequence of commands to operate correctly the laser are sent through the above-mentioned I<sup>2</sup>C bus and the digital outputs of the microcontroller.

#### A. Laser attenuation commands.

The light attenuation level is set with the I2C command: The attenuation voltage of the 2 KHz control can be set to 255 values from 0 V as minimum value to 20 V as maximum value (Fig. 8 shows the light intensity versus the voltage applied)

#### B. Switch on-off the laser commands.

In order to switch on the laser, once the laser frequency and the level of attenuation have been previously fixed, two I2C commands have to be sent with a delay of at least one second between both commands. To switch off the laser, the same sequence should be sent.

## IX. SUMMARY AND CONCLUSIONS

A new Laser Beacon designed for the ANTARES neutrino telescope has been presented. The new LB provides more than twice energy per pulse that their predecessor in ANTARES and it has been built in a shorter and narrower titanium container. It has been implemented in the ANTARES Instrumentation Line completing the foreseen time calibration system of ANTARES and will provide important tests for the instrumentation of the KM3NeT time calibration system. The Instrumentation Line with the new

Laser Beacon version was deployed last June and it is foreseen to start operation at the end of this year.

## ACKNOWLEDGMENT

The authors acknowledge the financial support of the funding agencies:

Centre National de la Recherche Scientifique (CNRS), Commissariat à l'énergie atomique et aux énergies alternatives (CEA), Agence Nationale de la Recherche (ANR), Commission Européenne (FEDER fund and Marie Curie Program), Région Alsace (contrat CPER), Région Provence-Alpes-Côte d'Azur, Département du Var and Ville de La Seyne-sur-Mer, France; Bundesministerium für Bildung und Forschung (BMBF), Germany; Istituto Nazionale di Fisica Nucleare (INFN), Italy; Stichting voor Fundamenteel Onderzoek der Materie (FOM), Nederlandse organisatie voor Wetenschappelijk Onderzoek (NWO), the Netherlands; Council of the President of the Russian Federation for young scientists and leading scientific schools supporting grants, Russia; National Authority for Scientific Research (ANCS), Romania; Ministerio de Ciencia e Innovación (MICINN), Prometeo of Generalitat Valenciana and MultiDark, Spain. We also acknowledge the technical support of Ifremer, AIM and Foselev Marine for the sea operation and the CC-IN2P3 for the computing facilities.

The authors also acknowledge NCHyperbaric, SA for the kind disposal of their installations for the hyperbaric test of the LB container

## REFERENCES

- [1] J.A. Aguilar et al. "ANTARES: the first undersea neutrino telescope". To appear in Nucl. Instr. and Meth., April 2011.
- [2] J.A. Aguilar et al., ANTARES Collaboration, "Study of large hemispherical photomultiplier tubes for the ANTARES neutrino telescope", Nucl. Instr. And Meth. A 555 (2005) 132-141
- [3] P.Amram et al. "The ANTARES optical module". Nucl. Instr. and Methods A484 (2002) 369
- [4] J. A. Aguilar et al, ANTARES Collaboration, "The data acquisition system for the ANTARES neutrino telescope", Nucl. Instr. and Meth. A 570 (2007)107-116
- [5] M. Ageron et al. "The ANTARES optical beacon system", Nucl. Instrum. Meth. A578 (2007) 498-509.
- [6] J.A. Aguilar et al.. "Time Calibration of the ANTARES neutrino Telescope" Astroparticle Physics 34 (2011) 539-549
- [7] J. A. Aguilar et al. "First results of the Instrumentation Line for the deep-sea ANTARES neutrino telescope ". Astroparticle Physics 26 (2006) 314
- [8] Microchip Technology Inc, <http://www.microchip.com/>
- [9] Modbus Organization, <http://www.modbus.org/>
- [10] NXP Semiconductors, <http://www.nxp.com>

## 5.3 The Time Calibration System of KM3NeT: The Laser Beacon and the Nanobeacon

El tercer artículo se titula “The Time Calibration System of KM3NeT: The Laser Beacon and the Nanobeacon”. Este artículo se presentó en el congreso MARSS de 2014 en Benidorm siendo seleccionado para su publicación en la revista “Lecture Notes in Computer Science” en febrero de 2015. En esta revista todos sus artículos son revisados por pares. Según la última edición publicada del Scimago Journal Ranking (2015) esta revista tiene un índice SJR de 0,369 y se encuentra en el segundo cuartil del área “Computer Science (miscellaneous)”.

En este artículo se presenta la instrumentación del sistema de calibración temporal de KM3NeT. La calibración relativa entre módulos ópticos debe de tener una precisión alrededor del nanosegundo. La instrumentación consiste de dos aparatos: un nanobeacon dentro de cada módulo óptico para la calibración de módulos ópticos en la misma DU, y un *laser beacon* para la calibración de módulos ópticos en múltiples DUs.

# The Time Calibration System of KM3NeT: The Laser Beacon and the Nanobeacon

Diego Real<sup>(✉)</sup> and David Calvo

IFIC. Instituto de Física Corpuscular, CSIC-Universidad de Valencia,  
C/Catedrático José Beltrán, 2, 46980 Paterna, Spain  
{real,dacaldia}@ific.uv.es

**Abstract.** The KM3NeT collaboration has started the construction of a deep sea neutrino telescope in the Mediterranean with an instrumented volume of several cubic kilometers. The objective of the KM3NeT telescope is to observe cosmic neutrinos. For this, the detector will consist of a tri-dimensional array of optical modules, each one composed of a pressure resistant glass sphere housing 31 small area photomultipliers. An important element of the KM3NeT detector is the system for the relative time calibration between optical modules with a precision of about 1 ns. The system comprises two independent devices: a nanobeacon inside each optical module for calibration of optical modules in the same vertical detection unit and a laser beacon for the calibration of optical modules of vertical units. After a general introduction of the KM3NeT project, a detailed description of the KM3NeT time calibration devices is presented.

**Keywords:** Neutrino telescope · Time calibration · Laser beacon · Nanobeacon

## 1 Introduction

KM3NeT [1] is a deep sea cabled research infrastructure to be deployed at the bottom of the Mediterranean Sea. The infrastructure will host a very large volume neutrino telescope distributed over three locations at depths of several kilometers. The main objective of the telescope is to detect extraterrestrial neutrinos with energies above 50 GeV to investigate the origin of the highest energy cosmic rays. The detection technique of the telescope is based on the detection of Cherenkov photons induced by the passage of relativistic charged particles through the sea water. If a neutrino interacts in the sea water in or in the vicinity of the detector or in the rock beneath it, it can produce a subatomic particle called *muon*, which travels through the detector at a speed exceeding that of light in water. Such an electrically charged particle generates Cherenkov radiation, visible as faint blue light that will be recorded by the highly sensitive light detectors of the telescope. The arrival times of the light collected by optical detectors disposed in a three dimensional array are used to reconstruct the *muon*

---

D. Real and D. Calvo: On behalf of the KM3NeT collaboration.

trajectory and consequently the direction of the neutrino, as these are strongly correlated. The instrumented volume of the KM3NeT detector will consist of a tri-dimensional array of *optical modules*, which are the core elements of a neutrino telescope. Vertical *detection units* are moored on the seabed, each comprising 18 optical modules distributed over a height of about 700 m. Horizontally, the detection units are separated by about 100 m. In the case of KM3NeT, the Digital Optical Module (DOM) is a pressure resistant glass sphere housing 31 small photomultipliers to measure the Cherenkov light and transform it into electronic signals. The electronics signals are read-out the front-end electronics inside the DOM, and the relevant information is sent to shore.

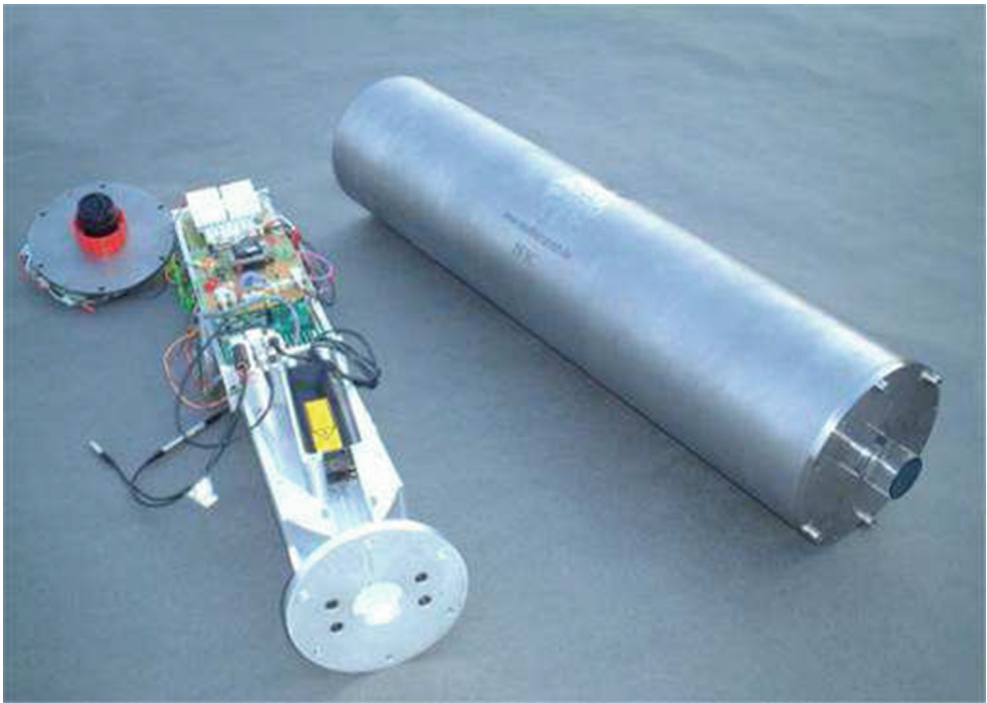
The angular resolution of the reconstructed *muon* track depends highly on the accurate measurement of the arrival time of Cherenkov photons reaching the photomultipliers in the optical modules. The quality of time and position calibration of the detector is therefore of utmost importance to achieve a good angular resolution. Deep sea neutrino telescopes have intrinsic and unavoidable limitations in the time precision due to the chromatic dispersion and scattering of light in sea water ( $\sigma \sim 2$  ns for a travelling distance of 50 m), and the combined effect of the photomultiplier transit time spread and electronics ( $\sigma \sim 1.5$  ns). Taking into account these intrinsic limitations, the required precision of a time calibration system to measure the relative time between optical modules should be  $\sigma \leq 1$  ns. Pulse light emitters (beacons) [2] are successfully used in the ANTARES neutrino telescope [3] (experiment precursor of KM3NeT) to measure *in situ* relative time offsets between optical modules [4]. LEDs and lasers located throughout the detector [5, 6] produce short duration and powerful light pulses which are detected by the photomultipliers, allowing the measurement of the time delay between the arrival of the photon at the photocathode and the time stamp by the front-end electronics. In KM3NeT, the time calibration procedure has been decoupled in two different techniques:

- Intra-DU Calibration: LED beacons, called *nanobeacons* in KM3NeT, will be used to calibrate DOMs in the *same* detection unit (DU). The system determines the time offset of the DOMs of the same DU. Each DOM is equipped with a nanobeacon with its LED pointing upwards.
- Inter-DU Calibration: Laser beacons will be used to calibrate DOMs at *different* detection units. The sideward light emitted from laser beacons allocated at the bottom of the KM3NeT detector in well-chosen positions will allow illuminating the first DOMs of several neighboring detection units.

## 2 The KM3NeT Laser Beacon

The KM3NeT Laser Beacon is a device that emits light by means of a diode pumped Q-switched Nd-YAG laser head (In the Fig. 1 is shown an open laser beacon). The laser head, together with all the associated electronics to control the device is housed inside a cylindrical titanium container high pressure and seawater corrosion resistant. A voltage-controlled optical attenuator consisting of a liquid crystal retarder and a linear polarizing beam-splitter cube is used in order to remotely control the light

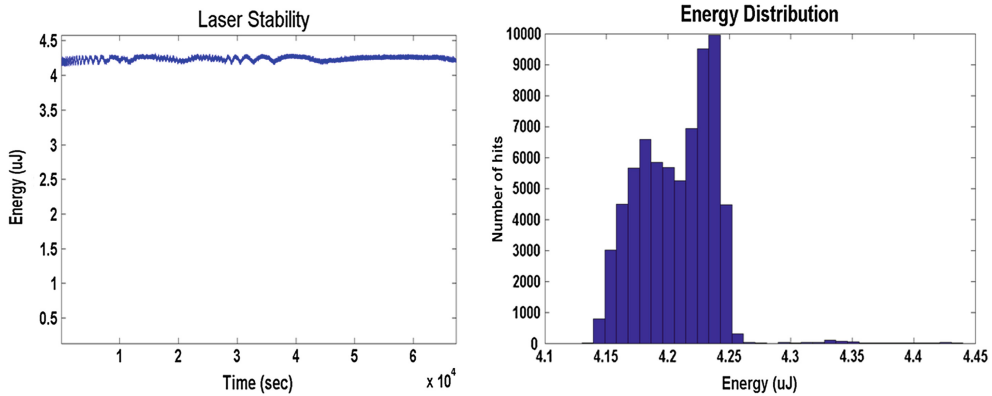
intensity emitted by the laser. A glass rod, mounted in an opening in the top-cap of the container, permits the laser beam to go outside. A flat disk diffuser that spreads the light beam outside following a Lambertian distribution is mounted in the inner side of the glass rod. Hence, the light leaves the cylinder through its vertical wall where biofouling is negligible; the upper part of the glass rod is painted black to avoid the light go outside. The dimensions of the glass rod and the top-cap have been calculated carefully to maximize the light going through the walls of the glass rod. The bottom end-cap of the titanium container holds a penetrator for the power supply and the external communications. Currently, two prototype KM3NeT Laser Beacons have been produced and are successfully operational since April 2013: one integrated in the instrumentation line of ANTARES and another one integrated in a prototype tower of NEMO Phase II project.



**Fig. 1.** An open KM3NeT Laser Beacon; visible are the glass rod, with its top painted black, the penetrator, the inner mechanics, the laser head and all the power and control electronics.

## 2.1 The Laser Head

The main component of the KM3NeT Laser Beacon is a diode pumped Q-switched Nd-YAG laser which produces short pulses with time duration of  $\sim 400$  ps (FWHM) and a total energy of about  $3.5 \mu\text{J}$  (data given by the manufacturer,  $4.15\text{--}4.25 \mu\text{J}$  measured in our lab as shown in Fig. 2). The laser head is the model STG-03E-1S0 from Teem-photonics which emits light with a wavelength of 532 nm. Other laser heads with higher energy per pulse are being evaluated, in particular one with energy per pulse of  $25 \mu\text{J}$ .



**Fig. 2.** Left: Measurement of the time-stability of the pulse-energy. Right: Histogram of the pulse-energy.

## 2.2 The Anti-biofouling System

The anti-biofouling system is composed of a diffuser disk and a quartz cylinder rod inserted in the upper titanium cap (details of the anti-biofouling system on Fig. 3). The laser beam points to the optical disk that spreads light out following a cosine distribution. The diffuser disk is glued to the lower surface of the quartz cylinder rod using a transparent epoxy resin.

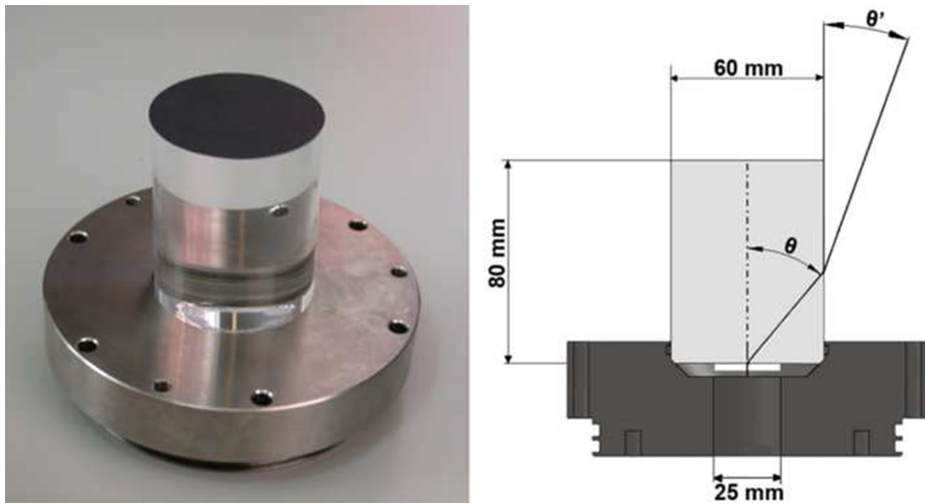
**Disk Diffuser.** The disk diffuser has a Lambertian theoretical distribution. The laser head is slightly deviated with respect to the vertical direction in order to prevent damages from its own reflected beam. Measurements in the laboratory have shown that this small tilt has no effect on the outgoing light distribution and that the distribution follows the theoretical one.

**Cylinder Quartz Rod.** The cylinder quartz rod is made of pressure-resistant quartz. The dimensions of the quartz cylinder have been calculated to optimize the maximum and minimum angle of the outgoing light. With the current design it is possible to illuminate DOMs located at a horizontal distance of 200 m and 50 m above the seabed.

## 2.3 The Voltage-Controlled Optical Attenuator

The amount of light emitted by the laser head is fixed. In order to overcome this limitation, a voltage-controlled optical attenuator is located in the beam path. Liquid crystal variable retarders consist of a thin crystal liquid layer placed into a small cavity made of parallel fused silica. The anisotropy of the liquid crystal molecules causes its birefringence. When a voltage is applied the molecules align parallel to the electric field. The higher the voltage, the lower the birefringence and the delay of the optical phase are. This allows the electrical tuning of a linearly polarized beam. Since the light from the laser is linearly polarized, the attenuation can be achieved by the combination of a liquid crystal variable retarder and a linear polarizer. The liquid crystal head is the

retarder model LVR-100-532 from Meadowlark Optics. The polarizer used is a broadband polarizing cube beam-splitter from Newport, model 05FC16 PB.3, together with his holder, model CH-0.5. The beam-splitter cube consists of two right-angle prisms where the hypotenuse of one of the prisms is coated with a multilayer dielectric polarizing beam-splitter. The incoming beam is divided into two orthogonal, linearly polarized components in such a way that p-polarized light is transmitted while s-polarized light is reflected. The used model is optimized to work in the 420–680 nm range. The reason to use a beam-splitting polarizing cube is that it presents a higher damage threshold to laser exposure than that of a standard linear polarizer and that it can fulfill the expected life time of KM3NeT.



**Fig. 3.** Detail of the Laser Beacon anti-biofouling system (left) and a technical drawing of the system (right).

### 3 The KM3NeT Nanobeacon

The main goal of the KM3NeT Nanobeacon is to perform *intra-DU* calibration, i.e. calibration between the DOMs of the same detection unit. The nanobeacon is integrated in the DOM and consists of a small electronics board that controls an LED pointing upwards. The mechanical integration inside the DOM avoids the need for a mechanical container for the device which reduces substantially the cost of this calibration device. The LED emits an ultra-short light pulse ( $\sim 2\text{--}3$  ns of rise time) when the appropriate command is received. The main component of the nanobeacon electronics is the pulser that provides the electrical signal to enable the LED to flash. The nanobeacon light intensity and rate of emission can be changed. In order to do this the pulser is controlled remotely via two I2C control signals. Geometrical considerations show that a  $15^\circ$  opening angle is sufficient to illuminate DOMs located on the same detection unit allowing potential misalignments smaller than  $10^\circ$ . At present, 11 prototype KM3NeT Nanobecons have been already been produced; eight of them have been are

successfully operational integrated in a prototype tower of the NEMO Phase II project; three more have been integrated in the DOMs in a prototype KM3NeT detection unit that is awaiting deployment.

### 3.1 The LEDs

Several LED models have been tested in the laboratory. Based on comparative studies of amplitude and rise-time of the emitted pulses and angular distribution of light, four models were preselected as suitable for use in the KM3NeT Nanobeacon device. Following the recovery of ANTARES line 12, these new models were incorporated in the lowest of the LED Optical Beacon (LOB) of the line and tested *in situ* after the redeployment of the line (the results are presented in Fig. 4). Comparing with the original LEDs used in ANTARES, these new models are more powerful but have a smaller opening angle. The reason for this is that the ANTARES LOBs were originally designed to illuminate also nearby lines, so LED caps were machined off to widen the angular distribution of the emitted light. However, in a decoupled system in which the nanobeacons are used to illuminate the optical modules in the same detection unit, a modified LED angular distribution is not necessary and uncleaved LEDs allow for longer ranges. Table 1 summarizes the characteristics of the four pre-selected models.

**Table 1.** Main properties of the four preselected LED models for KM3NeT

Model	Wavelength (nm)	Rise Time (ns)	Angular Occupancy, FWHM (°)	Intensity (pJ)	Range for 0.1 p.e./flash (m) (see Fig. 4)
CB26	470	2.4	23	150	230
CB30	472	2.0	28	90	195
NSPB500	470	3.2	20	170	250
AB87	470	2.4	51	130	235

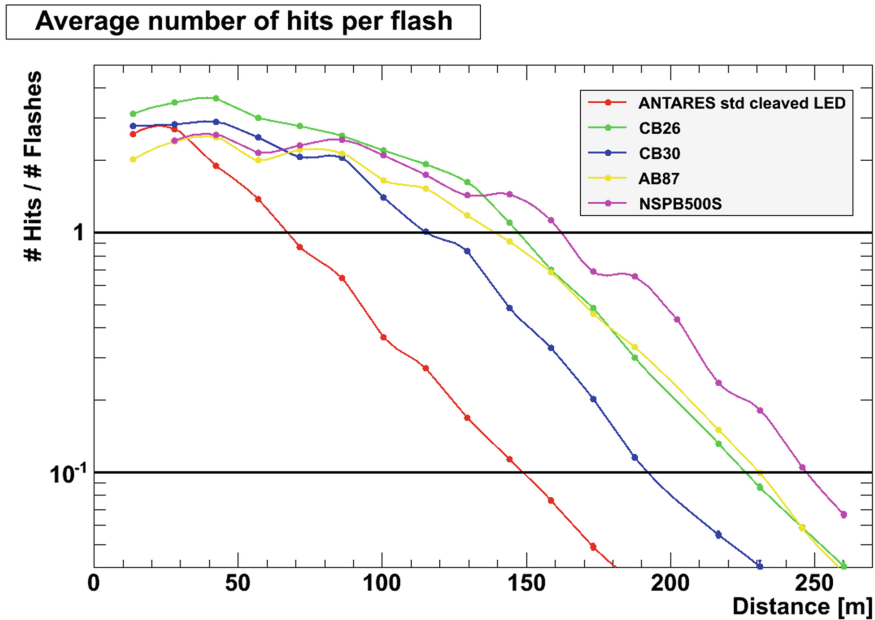
### 3.2 Electronics

The KM3NeT Nanobeacon electronics consists of two components, the pulser and the control electronics. Currently, the control electronics has been integrated in the central logic board and power board of the DOM. The pulser circuit is based on an original design from Kapustinsky [7] that has been modified for KM3NeT. The trigger is provided by a 1.5 V negative square pulse of around 150 ns superimposed on a negative DC bias that can be varied from 0 to 24 V. The DC component charges the capacitor and the rising edge of the differentiated 1.5 V pulse switches on the pair of transistors, triggering the fast discharge of the 100 pF capacitor through the low impedance path that includes the LED. The parallel inductor develops charge in opposition to the discharging capacitor reducing its time constant. The level of the DC voltage determines the amount of current through the LED and thus the intensity of the emitted pulse. The foreseen typical trigger frequency will be between 5 kHz up to



20 kHz. The nanobeacon control board is in charge of providing the pulser with two control signals, one to set up the light intensity emitted by the LED and the other one to set up the flashing frequency. It is also possible to select how the trigger signal is provided, either internally (self-triggering) or fixed by an external signal. The electronics consists of two main blocks: the trigger, which can provide a variable signal to the Nanobeacon pulser to fix its flashing frequency, and the booster, that provides the power needed to fix the intensity of the flash emitted by the LED. The trigger signal is controlled with a variable DC voltage that is provided by the Digital Analog Converter (DAC) block. This voltage is set up via I2C. The output provided by the trigger is a squared signal changing from 0 to 3 V, whose frequency can vary from 5 to 20 kHz. The power supply to set the light intensity of the pulser is provided by the booster.

The booster is provided directly from the power supply and the output voltage is controlled with a variable potentiometer also via I2C. The output varies from 3 V to 24 V. The trigger configuration, external or internal, is chosen using an I2C controlled DAC.



**Fig. 4.** Average number of hits (photo – electrons) per flash as a function of the distance. For the four preselected LED model, measurements were carried out in the ANTARES detector.

## 4 Summary and Conclusions

The KM3NeT Laser Beacon and KM3NeT Nanobeacon time calibration devices have been presented. Two prototype Laser Beacons have already been deployed and are successfully operational: one integrated in the ANTARES instrumentation line (3.5  $\mu\text{J}$ ) and another one in a prototype tower of the NEMO-phase II project (3.5  $\mu\text{J}$ ). For the first phase of construction of KM3NeT, a more powerful head with 25  $\mu\text{J}$  per pulse is

under evaluation. Four LED precandidates for the KM3NeT Nanobeacon have been evaluated in ANTARES. Eleven prototype KM3NeT Nanobecons have already been deployed and are successfully operational since April 2013: eight in a prototype tower of the NEMO-phase II project; another one in a prototype KM3NeT DOM integrated in the ANTARES instrumentation line. Currently, three prototype KM3NeT Nanobecons have been integrated in DOMs in a prototype KM3NeT detection awaiting deployment.

**Acknowledgments.** The authors acknowledge the financial support of the Spanish Ministerio de Ciencia e Innovación (MICINN), grants FPA2009-13983-C02-01, FPA2012-37528-C02-01, ACI2009-1020, Consolider MultiDark CSD2009-00064, RYC-2012-10604, European Community's Sixth Framework Programme under contract n° 011937 and the Seventh Framework Programme under grant agreement n° 212525 and of the Generalitat Valenciana, Prometeo/2009/026.

## References

1. KM3NeT Technical Design Report
2. Amram, P., et al.: The ANTARES optical module. Nucl. Instr. Methods **A484**, 369 (2002)
3. Aguilar, J.A., et al.: ANTARES: the first undersea neutrino telescope. Nucl. Instr. Methods Phys. Res **A656**, 11–38 (2011)
4. Aguilar, J.A., et al.: ANTARES collaboration, “study of large hemispherical photomultiplier tubes for the ANTARES neutrino telescope”. Nucl. Instr. Meth. **A555**, 132–141 (2005)
5. Aguilar, J.A., et al.: Time calibration of the ANTARES neutrino telescope. Astropart. Phys. **34**, 539 (2011)
6. Toscano, S., et al.: Time calibration and positioning for KM3NeT. Nucl. Instrum. Meth. **A602**, 183 (2009)
7. Kapustinsky, J.S., et al.: Nucl. Instr. Meth. Phys. Res **A241**, 612. (1985)

# Electrónica de Adquisición de KM3NeT

## 6

” *The next step of invention was made in 1904, when I placed around the filament of an electric lamp a cylinder of metal sealed inside the bulb, and found that a current of negative electricity could be sent from the filament to the cylinder but not in the opposite direction.*

— John Ambrose Fleming

## 6.1 The data acquisition system of the KM3NeT detector

Este artículo se publicó en la revista “Proceedings of Science” en 2015. En esta revista todos sus artículos son revisados por pares. De acuerdo con la edición de ese año del SCImago Journal Rank esta revista figura con un índice de impacto de 0,119.

En el artículo se presenta una primera aproximación a la electrónica de readout de KM3NeT junto con el sistema de TriDAS (Trigger and Data Acquisition System) utilizado para el procesamiento de los datos transmitidos desde los DOMs (Modulo Óptico Digital - *Digital Optical Module*) de KM3NeT.

# The data acquisition system of the KM3NeT detector

**Simone Biagi**<sup>\*†</sup>

*INFN, Laboratori Nazionali del Sud, Catania, Italy*

*E-mail:* [biagi@bo.infn.it](mailto:biagi@bo.infn.it)

**Tommaso Chiarusi**

*INFN, Sezione di Bologna, Bologna, Italy*

*E-mail:* [chiarusi@bo.infn.it](mailto:chiarusi@bo.infn.it)

**Paolo Piattelli**

*INFN, Laboratori Nazionali del Sud, Catania, Italy*

*E-mail:* [piattelli@lns.infn.it](mailto:piattelli@lns.infn.it)

**Diego Real**

*IFIC, Instituto de Física Corpuscular (CSIC-Universitat de València), València, Spain*

*E-mail:* [real@ific.uv.es](mailto:real@ific.uv.es)

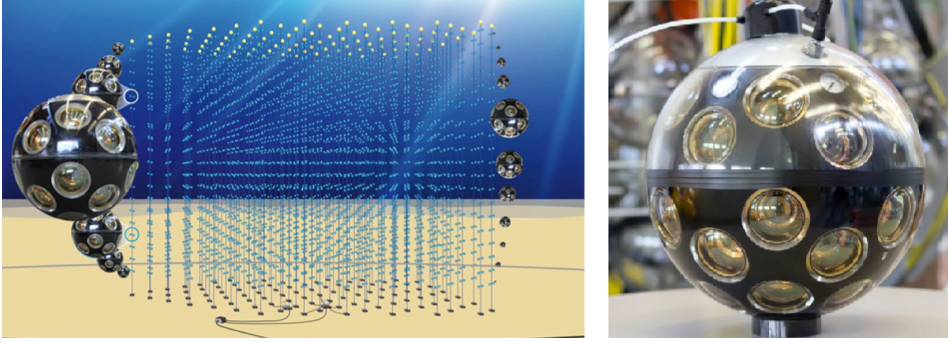
The KM3NeT neutrino telescope is part of a deep-sea research infrastructure being constructed in the Mediterranean Sea. The basic element of the detector is the Detection Unit, a 700 meter long vertical structure hosting 18 Digital Optical Modules (DOMs). The DOM comprises 31 3" photomultiplier tubes (PMTs), various instruments to monitor environmental parameters, and the electronic boards for the digitization of the PMT signals and the management of data acquisition. Dedicated readout electronics have been developed and are installed inside each DOM, allowing to measure the time of arrival and the duration of photon hits, on each of the 31 photomultiplier tubes, with a time resolution of 1 ns. Moreover, the data transmission system supports the maximum throughput from a DOM of 200 Mbps, which correspond to a photon-hit rate of  $\sim 130$  kHz per each 3" PMT. Due to the extreme operation conditions of the abyssal site, the all-data-to-shore concept is used in order to minimize the complexity of the offshore detector. The processing of the data transmitted to onshore is performed by the Trigger and Data Acquisition System (TriDAS). The networking infrastructure and computing resources are conceived to be modular and scalable in order to manage the full data rate from the final cubic-kilometer scale telescope. The electronics and the DAQ system described in the poster are currently under test in the first Detection Unit to be deployed offshore Toulon.

*The 34th International Cosmic Ray Conference,  
30 July- 6 August, 2015  
The Hague, The Netherlands*

---

<sup>\*</sup>Speaker.

<sup>†</sup>On behalf of the KM3NeT Collaboration.



**Figure 1:** Left: A sketch of the KM3NeT detector in its final configuration. Right: A Digital Optical Module.

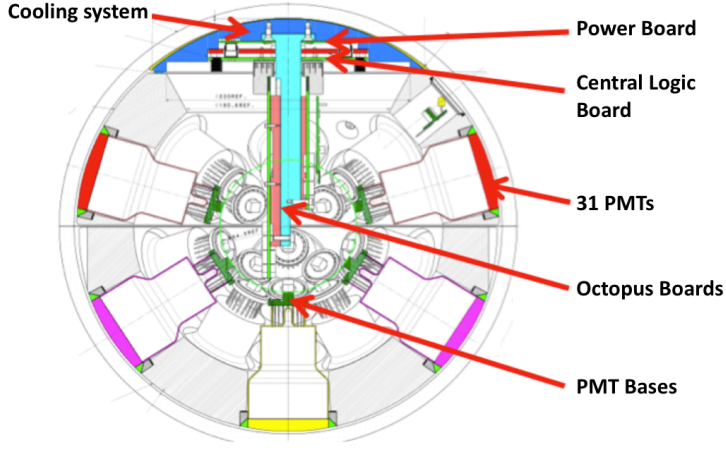
## 1. Introduction

KM3NeT (KM<sup>3</sup>-scale Neutrino Telescope) is a future European research facility in the Mediterranean Sea which will house a neutrino telescope of cubic kilometer scale [1]. Cherenkov light from neutrino induced secondary particles will be detected by an array of optical modules consisting in high pressure resistant glass vessels with photomultipliers inside. This vessel is called Digital Optical Module (DOM) and it is composed of 31 3" Photomultiplier Tubes (PMT) distributed around the glass sphere, which collect the Cherenkov light and transform it into electronic signals [2]. 18 DOMs are arranged on string-like structures anchored on the sea bed and kept vertical by a buoyancy system, the so-called Detection Units. The Detection Units are connected with submarine Junction Boxes and through them to shore for power feed and data transmission. Fig. 1 shows an overview of the KM3NeT detector and an assembled DOM.

The all-data-to-shore data taking approach follows the choice done by ANTARES [3]. In this context, no trigger is done underwater, but all signals from PMTs arrive onshore where they are triggered and processed by farm of computers. The Trigger and Data Acquisition System (TriDAS) must be able to handle an extremely large throughput of data arriving from off-shore; the DAQ modularity and scalability are needed properties for a detector made of hundreds of Detection Units that could be added or recovered without interfering with the data acquisition.

## 2. Readout electronic components

Inside the DOM, the 31 PMTs are suspended in a foam support structure: 19 PMTs in the lower hemisphere and the remaining 12 in the upper hemisphere. Each PMT has its own adjustable high voltage supply integrated in the PMT base. The PMTs collect the Cherenkov light and convert it into electronic signals. In order to translate these signals into the arrival time of the photons, they are processed by Time to Digital Converters (TDC) core embedded in the Field Programmable Gate Array (FPGA) of the Central Logic Board (CLB) [4]. The CLB integrates the White Rabbit Protocol [5], a fully deterministic Ethernet-based network for general purpose data transfer and synchronization, that allows to synchronize all the KM3NeT DOMs with 1 ns resolution. The data



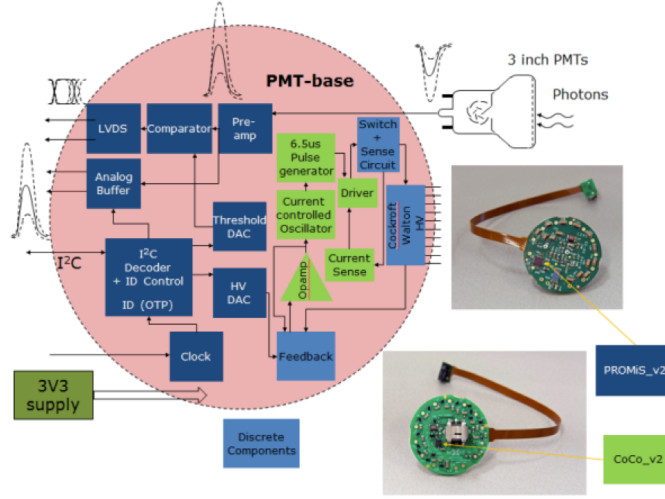
**Figure 2:** The Digital Optical Module in details. The Power Board, the Central Logic Board, the Octopus Board and the PMT Bases are indicated by arrows.

provided by the PMT bases is collected and distributed to the CLB by means of two boards (one for each hemisphere), the so-called Octopus Boards. It also contains the electronic components for an optical link to the shore. All necessary DC power is provided by the Power Board (PB) [6]. An aluminium structure provides heat conduction between the electronics inside and the exterior of the sphere. In Fig. 2 a schematic view of the DOM is shown. In this section, all the electronic boards contained in the DOM are reviewed.

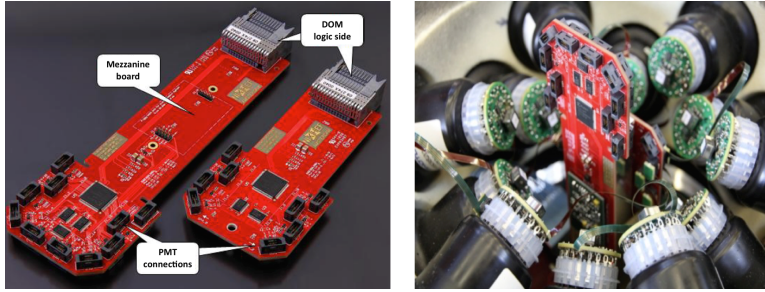
## 2.1 Photomultiplier Base

The PMT Base is in charge of discretizing the signal read by the PMT and to provide the High Voltage (HV) for the PMT. The PCB contains a pre-amplifier, a comparator (Time over Threshold) and an I<sup>2</sup>C decoder. Connection to the PMT is done by flying leads with a PCB that has a diameter of 38 mm. Every PMT must give the same output signal when it is hit by a single photon. The gain of a PMT depends on the supplied high voltage. The HV for each PMT is individually adjustable from 800 to 1400 V. Consequently each PMT gets its own HV circuit board. I<sup>2</sup>C protocol is used to be able to program the PMT Base and to change the HV. The power consumption of each PMT Base is around 4.5 mW.

An additional function of the PMT Base is the digitization of the analogue output signal of the PMT. The output signal is converted from a charge signal to a voltage signal, followed by a conversion to a digital level by a comparator, resulting in a Time over Threshold (ToT) signal. The comparator can be adjusted to the required ToT value using I<sup>2</sup>C protocol. The ToT signal is transferred to the DOM logic by a LVDS connection. To identify the PMT Base an ID circuit is added. The analogue and digital signal conversion functionality of the PMT Base is performed in an ASIC. The PMT Base diagram is shown in Fig. 3.



**Figure 3:** The diagram and 2 pictures (front/rear) of the PMT base.



**Figure 4:** Left: Large and Small Octopus Boards. Right: Close up of the Octopus Board mounted in the DOM.

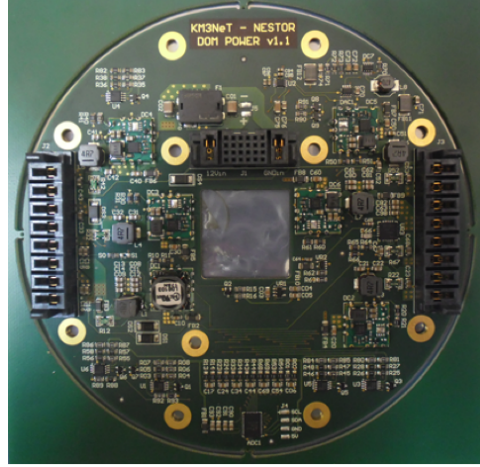
## 2.2 The Octopus Board

Within each hemisphere, the LVDS signals from the PMT bases are collected on a custom electronics board (Fig. 4), referred to as the Octopus Board and transferred to the CLB of the DOM. The Octopus Boards also provide connection for the electrical power to the PMT bases and the I<sup>2</sup>C communication control. For each PMT, the electrical power can be switched on/off individually by the slow control and in case of overload of a PMT the power will be switched off automatically. This can be monitored by the Fault Flag (FFLG). A clock enabled signal to the PMTs for the I<sup>2</sup>C communication avoids digital interference.

## 2.3 The Power conversion Board

For an efficient transfer of the electrical power the voltage level must be high and the current low, because of the power loss depends on  $I^2 \cdot R$  of the cable. In addition, the different electronic components of the DOM require many different voltage levels for their performance. Therefore,





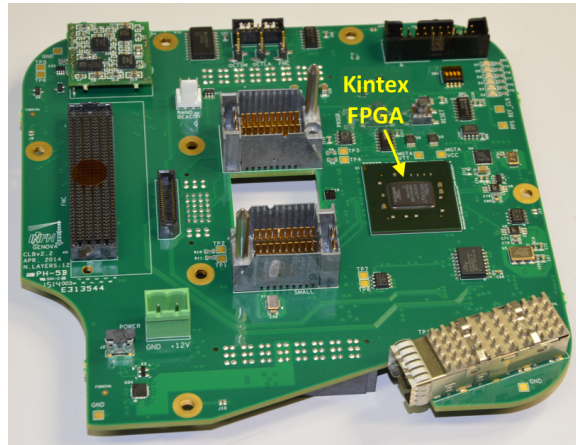
**Figure 5:** Picture of the first prototype of the DOM Power Board.

the Power conversion Board (PB) inside the DOM derives all different client voltage levels from an input voltage of 12 V. Modern converters at high frequency are used to obtain a high efficient power conversion. To protect the other electronics inside the DOM against possible high frequency noise interference, the converter board is located in a shielded part of the cooling system. In addition, the cooling of the board is more efficient at this location. The PB is shown in Fig. 5.

## 2.4 The Central Logic Board

The DOM Central Logic Board (CLB) is the main electronic board in the readout chain of KM3NeT. The LDVS signals generated by the PMT Bases and collected and distributed by the Octopus Boards arrive to the CLB where they are discretized by means of 1 ns resolution TDCs. The TDC data are sent onshore after being organized and timestamped by the CLB. The CLB takes care also of the readout of several instruments, as it is the case of the compass, tilt-meter and temperature sensor, all of them integrated on the same PCB, an acoustic piezo sensor, an LED nano-beacon and a hydrophone. In order to synchronize the DOMs in KM3NeT, the CLB integrates the White Rabbit protocol [5]. It provides sub-nanosecond accuracy and picoseconds precision of synchronization for large distributed systems (more than 1000 nodes over optical fibres and copper wires with a length of up to 100 km). Using the White Rabbit, we are able to achieve precise time-tag measured data and trigger data taking in large installations and, contemporarily, the same network can be used for data transmission. The key technologies used are the Synchronous Ethernet (SyncE) and the Precision Time Protocol (PTP).

The main component of the CLB is a Kintex7 FPGA [7]. This device also allows the reconfiguration of the firmware of the CLB. It is feasible to store up to four FPGA images in an SPI memory, three of them reconfigurable. The non-reconfigurable image provides a safe start for the FPGA in case of corruption of the 3 reconfigurable images, being possible to choose to boot the FPGA with any of the other three. Fig. 6 shows the CLB board containing the FPGA where the readout and communication systems are implemented.



**Figure 6:** The Central Logic Board.

The Kintex7 FPGA is an FPGA family providing very low power consumption allowing a total CLB power consumption below 4 watts. The control of the CLB is achieved through embedded software running in an LM32 [8], an open source firmware microprocessor from Lattice. No operative system is used in order to reduce power consumption. The CLB firmware implements two LM32 CPUs. One of them resides in the WR core which is dedicated to handle the PTP traffic and controlling the Phase Locked Loops (PLL) that are part of the timing system. The other CPU takes care of the slow control communication with the shore station.

## 2.5 The CLB readout firmware

TDC channels were designed in a Xilinx Kintex7. Because of the programmable characteristic of an FPGA, a TDC readout implemented in this device has flexible characteristics. Here, a simplified TDC is designed to verify the idea of deserializing the raw data by means of dedicated input/output blocks of the FPGA. The CLB board includes a 25 MHz crystal oscillator, the clock signal is first transferred from a clock pin to a buffer in the centre of the FPGA, and then fanned out to the inner PLLs to provide two high frequency clocks of 250 MHz and 90° phase shifted. A 4-oversampling method increases the sampling frequency up to 1 GHz achieving the desired accuracy of 1 ns. The samples produced by deserializers are sent to specific blocks called Data Recovery Units (DRUs) where the data are reorganized and the digital pulse information is computed. The system readout generates an output of 48 bits where the 8 most significant bits are used to encode the PMT identifier, the next 32 bits indicate the time-stamp and the 8 less significant bits are used to digitize the length of the pulse.

Data are chopped in periods of time called frames or timeslices. The data-stream split into timeslices grants the scalability of the DAQ system; each timeslice is self-consistent and the probability of having events which are cut in two parts across two subsequent timeslice is negligible. Frames start at regular (programmable) intervals. Each frame is assigned a UTC time stamp and it is therefore uniquely identified. The CLB timing reference clock with a 1 ns phase precision and

the UTC time are supplied by the White Rabbit PTP Core (WRPC) [5] that is implemented in the firmware. TDC data is transmitted to shore via the endpoint of WRPC. This endpoint is basically a normal Ethernet MAC that uses the PTP system; a sub-nanosecond timing precision is achieved. The MAC is connected to an IP/UDP packet buffer stream selector (IPMUX). This IPMUX splits the data connecting to the MAC into separate streams, based on the UDP port number. In the first place, data need to be shipped from the DOM to the shore station, so the IPMUX is mainly used as an UDP transmitted. Data received from the TDCs are stored in the Front-End FIFO memories and consequently passed to the IPMUX.

More functions have been integrated into the TDC firmware or are under development, such as the high-rate veto function to avoid overloading the communication bandwidth and the multi-hit function to process pulse widths larger than 255 ns. 31 TDC channel have been implemented, but the appropriate number of channels can be chosen according to the requirements of each DOM. The current implementation also offers a wide variety of interface options like an enable interface, which allows enabling or disabling remotely the TDC channels using the embedded software based on the LM32 microprocessor.

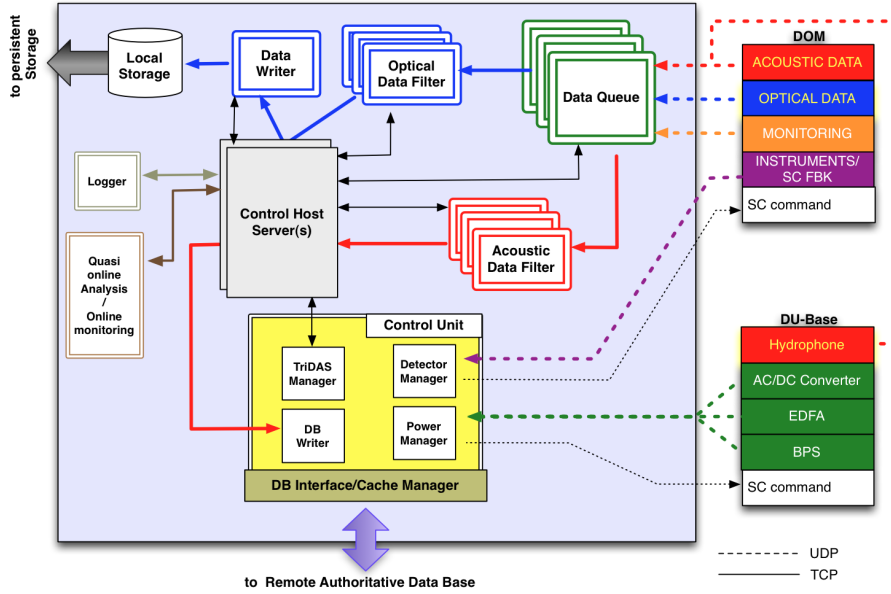
### 3. The Trigger and Data Acquisition System

The ensemble of hardware infrastructures and software collections in charge of the data acquisition, aggregation, filtering and save-to-disk is called TriDAS (Trigger and Data Acquisition System). All the TriDAS elements are connected within a local 10Gbps network which comprises also the underwater detector. No hardware triggers are implemented at the underwater detector; all the measured signals are sent to the shore station where they are filtered and recorded.

The first step of the data aggregation onshore is the Data Queue process (DQ, Fig. 7), that distributes unfiltered data arriving from a sector of the detector to the computer farm that takes care of the trigger, the DataFilter (DF). There are two different types of DF: the acoustic DataFilter is responsible of the online analysis of data from acoustic sensors for the positioning system; the optical DataFilter is the software devoted to the trigger of PMT data (Fig. 7). Each optical DF receives from all the active DQs a block of data related to a specific time window (the timeslice) with a typical length of 100 ms. The optical DF handles the data of the entire apparatus with respect to the assigned timeslice. The filtered data are finally sent to a DataWriter, that writes on disk a ROOT file [9].

Each acoustic DF receives all data arriving from a DQ in a continuous stream, calculates the sound arrival time produced by the underwater positioning system and sends the result to a DataBase. The ControlUnit (CU, Fig. 7), which is the user interface of the detector, coordinates all the operations of the TriDAS and operates the DOMs using a dedicated Slow Control (SC) protocol. The number of necessary DFs scales with the detector throughput and with the algorithms complexity without changing the DAQ design. The data reduction is more than a factor  $10^3$  with respect to the throughput from the detector.

The optical background measured by the 3-inch PMTs, due to the environmental sources such as the  $^{40}\text{K}$  decay and the bioluminescence, is  $\sim 7$  kHz and causes a large throughput from the detector. The acoustic stream from the positioning system is also relevant (from  $\sim 1/4$ - $1/2$  of the



**Figure 7:** General architecture of the TriDAS for KM3NeT according to the all data to shore approach. The shore network infrastructure (gray filled parts) is based on the 10 Gb Ethernet.

optical stream). A  $\sim 120$  Gbps throughput is expected from the full detector composed of 690 Detection Units, assuming a photon-hit rate of 6 kHz for each 3" PMT.

#### 4. Conclusions

The data acquisition system of KM3NeT has been presented. The electronics inside every DOM reads and digitizes the signal from the 31 3-inch PMTs. Data are processed in parallel by an FPGA which implements 31 TDCs with 1 ns resolution and the White Rabbit protocol. Data are sent onshore packed in timeslices of a fixed time duration with a unique timestamp. Onshore data are filtered and triggered by the TriDAS, and finally stored on disk for analysis. The first Detection Unit of KM3NeT that uses all the technologies described here will be installed soon offshore the French coasts near Toulon [10].

#### References

- [1] <http://www.km3net.org>
- [2] S. Adrián-Martínez et al. (KM3NeT Collaboration), *Expansion cone for the 3-inch PMTs of the KM3NeT Optical Modules*, *JINST* **8** (2013) T03006.
- [3] M. Ageron et al. (ANTARES Collaboration), *ANTARES: the first undersea neutrino telescope*, *Nucl. Instr. Meth. A* **656** (2011) 11.

- [4] S. Biagi and A. Orzelli (KM3NeT Collaboration), *The Central Logic Board and its auxiliary boards for the optical module of the KM3NeT detector*, *JINST* **9** (2014) C12033.
- [5] [http://www.ohwr.org/projects/wr-cores/wiki/wrpc\\_core](http://www.ohwr.org/projects/wr-cores/wiki/wrpc_core)
- [6] E. Anassontzis et al. (KM3NeT Collaboration), *Design and development of the Power Converter Board within the Digital Optical Module in KM3NeT*, *PoS (TIPP2014) 188* (2014).
- [7] <http://www.xilinx.com/products/silicon-devices/fpga/kintex-7.html>
- [8] <https://en.wikipedia.org/wiki/LatticeMico32>
- [9] <http://root.cern.ch>
- [10] A. Creusot (KM3NeT Collaboration), *Calibration, performances and tests of the first detection unit of the KM3NeT neutrino telescope*, in proceedings of 34<sup>th</sup> ICRC, The Hague, The Netherlands, *PoS (ICRC2015) 1154* (2015).

## 6.2 Status of the central logic board (CLB) of the KM3NeT neutrino telescope

Este artículo fue publicado en la revista “Journal of Instrumentation” en 2015. En esta revista todos sus artículos son revisados por pares. De acuerdo con la edición de ese año del Journal Citation Reports esta revista figura con un índice de impacto de 1,310 y se encuentra en el segundo cuartil del área “Instruments & Instrumentation”.

En el artículo se presenta el status de desarrollo de la principal tarjeta de la electrónica de adquisición de KM3NeT, la CLB (Central Logic Board). La CLB incluye un sistema multiboot que permite la reconfiguración de los DOMs de KM3NeT de forma remota. Además todos los módulos y subsistemas se controlan mediante dos microcontroladores embebidos, implementados en una FPGA de la familia Kintex de Xilinx.

## Status of the central logic board (CLB) of the KM3NeT neutrino telescope

To cite this article: D. Calvo and D. Real 2015 *JINST* **10** C12027

View the [article online](#) for updates and enhancements.

### Related content

- [High resolution time to digital converter for the KM3NeT neutrino telescope](#)  
D. Calvo and D. Real
- [The KM3NeT neutrino telescope](#)  
R Coniglione and KM3NeT collaboration
- [KM3NeT: designing a cubic-kilometre scale neutrino telescope for the mediterranean](#)  
J Perkin and L F Thompson



**IOP | ebooks™**

Bringing you innovative digital publishing with leading voices to create your essential collection of books in STEM research.

Start exploring the collection - download the first chapter of every title for free.

TOPICAL WORKSHOP ON ELECTRONICS FOR PARTICLE PHYSICS 2015,  
SEPTEMBER 28<sup>TH</sup> – OCTOBER 2<sup>ND</sup>, 2015  
LISBON, PORTUGAL

## Status of the central logic board (CLB) of the KM3NeT neutrino telescope

---

**D. Calvo<sup>1</sup> and D.Real on behalf of KM3NeT collaboration**

*Instituto de Física Corpuscular (CSIC- Universidad de Valencia),  
Catedrático José Beltrán, 2, 46980 Paterna, Spain*

*E-mail:* [david.calvo@ific.uv.es](mailto:david.calvo@ific.uv.es)

**ABSTRACT:** The KM3NeT collaboration aims at the construction of a multi-km<sup>3</sup> high-energy neutrino telescope in the Mediterranean Sea consisting of thousands of glass spheres, each of them containing 31 photomultiplier of small photocathode area. The readout and data acquisition system of KM3NeT has to collect, treat and send to shore, the enormous amount of data produced by the photomultipliers, the acoustics sensor and the rest of the instrumentation. The electronics design includes a multiboot module which allows for the re-configuration of the nodes of the telescope remotely from the shore station. All the modules and subsystems are controlled by two embedded microprocessors, implemented on a Kintex-7 FPGA, and complex embedded software.

**KEYWORDS:** Timing detectors; Large detector systems for particle and astroparticle physics; Neutrino detectors; Front-end electronics for detector readout

---

Corresponding author.



---

## Contents

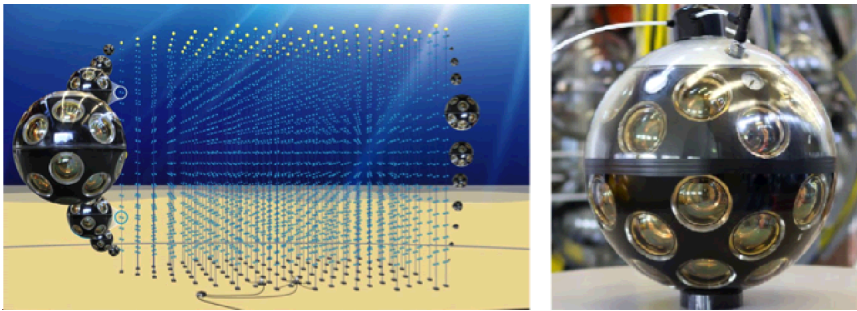
<b>1</b>	<b>The KM3NeT project</b>	<b>1</b>
1.1	KM3NeT requirements	2
<b>2</b>	<b>Hardware</b>	<b>2</b>
<b>3</b>	<b>Firmware</b>	<b>3</b>
<b>4</b>	<b>Software</b>	<b>5</b>
<b>5</b>	<b>Conclusions</b>	<b>5</b>

---

## 1 The KM3NeT project

The KM3NeT telescope is a deep-sea neutrino infrastructure to be deployed in the Mediterranean Sea (see figure 1, left). The telescope has been designed to detect extraterrestrial neutrinos with energies above 50 GeV by means of the Cherenkov photons induced by the passage of relativistic charged particles through the seawater [1]. When a neutrino interacts in the material surrounding the detector, it can produce a muon, which travels across the detector at a speed greater than the speed of light in water. Such a particle generates a faint blue luminescence called Cherenkov radiation. The arrival times of the photons collected by optical detectors disposed in a three dimensional array can be used to reconstruct the muon trajectory, and consequently that of the neutrino, which is strongly correlated. The main elements of a neutrino telescope are, therefore, the sensitive optical detectors which in the case of KM3NeT are small photocathode area photomultiplier tubes (PMTs) distributed around the glass sphere of the so called Digital Optical Module (DOM) [2] (see figure 1, right). Each DOM has 31 small photomultipliers that collect the Cherenkov light and convert it into electronic signals. Figure 1 shows the Digital Optical Module and the KM3NeT general overview.

In order to translate these signals into the arrival time of the photons, they are processed by Time to Digital Converters (TDCs) implemented on a Kintex-7 field-programmable gate array (FPGA). A TDC performs conversion of a time interval (TI) into a digital value. Many methods, both analogue and digital, can be used to achieve sub-nanosecond resolutions. These techniques can be designed both in application specific integrated circuit (ASIC) and FPGA devices. However, the design process of an ASIC device not only can be expensive, but also quite complex due to the long turn-around time and layout phase. Low cost and commercial availability are driving motivations for using general purpose FPGA to implement the TDC and the rest of the instrumentation control without using any external circuit in KM3NeT project.



**Figure 1.** Left: KM3NeT overview. Right: Digital Optical Module.

### 1.1 KM3NeT requirements

The KM3NeT neutrino telescope uses the all-data-to-shore concept. All digitized photon arrival times ( $t_0$ ) and time over threshold (ToT) that are recorded by the PMTs are sent via an optical fibre network to a shore station, where a farm of processors applies trigger and selection algorithms to reduce the data. This method allows for sophisticated algorithms to filter the overwhelming background by searching for space-time correlated photon hits which are signatures of neutrino interactions. The expected average photon-counting rate of 5–10 kHz per PMT will lead to an outgoing data-rate of a few MB/s per DOM.

The Central Logic Board (CLB) contains the hardware to process the produced data and to control all instrumentation located in the DOM. Each DOM is a node in an IP network and therefore has its own IP. In order to synchronize the DOMs in KM3NeT, the CLB integrates the White Rabbit protocol. It provides sub-nanosecond accuracy of synchronization for large distributed systems (more than 1000 nodes over optical fibres and copper wires with a length of up to 100 km). Using the White Rabbit, we are able to achieve precise time-tag measured data and trigger data taking in large installations and, contemporarily, the same network can be used for data transmission. The key technologies used are the Synchronous Ethernet (SyncE) and the Precision Time Protocol (PTP) [3].

## 2 Hardware

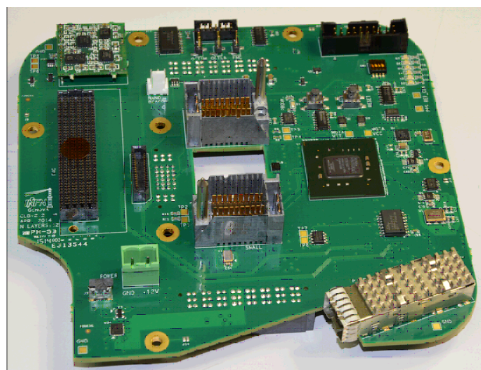
The CLB layout is composed of 12 layers, with:

- Six signal layers including top and bottom
- Two power planes
- Four ground planes

The layers are symmetrically disposed around the two power supply layers. Ground planes are positioned at the sides of the signal layers to have better signal integrity, as well as a limited number of vias was used. Particular attention was put on the differential pairs routing keeping the time difference of less than 100 ps between different PMT signals, and less than 20 ps between clock signals. The main component of the CLB is a Kintex-7 FPGA, where all the readout and

instrumentation functionalities are implemented. This device also allows for the reconfiguration of the firmware of the CLB. It is feasible to store up four FPGA firmware images in an SPI flash memory, three of them reconfigurable. The non-reconfigurable image provides a safe start for the FPGA, called the golden image, in case of corruption of any of the three reconfigurable images, being possible to choose any of the four to boot the CLB.

The Kintex-7 is an FPGA family providing very low power consumption allowing a total CLB power consumption below 4 watts. The CLB board is shown in figure 2.



**Figure 2.** Central Logic Board.

A reliability analysis using the FIDES guides [4] was performed, showing an estimated risk for failure of less than 10% after 15 years. Several signal integrity simulation were performed on different signals on the board, always showing a good level discrimination.

### 3 Firmware

The CLB is the responsible to synchronize all the nodes and it is also the main electronic board in the readout chain of KM3NeT. The digitized data are sent onshore after being organized and time stamped. The CLB takes care also of the readout of several instrumentation devices, as it is the case of the compass, tilt-meter, acoustic piezo sensor, LED nanobeacon and temperature sensor, all of them integrated on the same PCB.

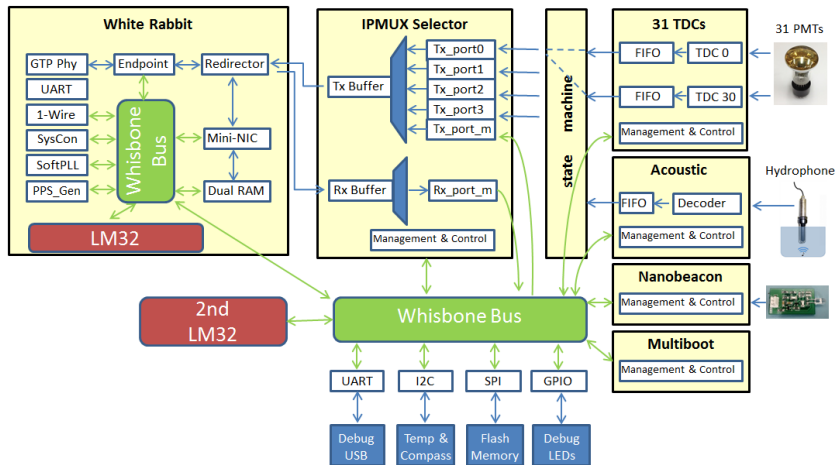
The CLB firmware is based on Lattice Mico LM32 embedded microprocessor, an open source firmware microprocessor from Lattice [5]. The system includes two LM32. One of them is dedicated to the White Rabbit protocol which directly manages the tunable oscillators and the optical link traffic, in order to achieve a time synchronization of sub-nanosecond level with the Grand Master clock of the on-shore station. The rest of the modules are managed by the second microcontroller, which has access to all the communication interfaces (SPI, UART, GPIO and I2C) needed for the instrumentation devices, the acoustic and optical readout systems and the multiboot module.

The CLB is responsible to control the readout systems. For the optic readout, the LVDS signals generated by the PMT bases arrive to the CLB where they are discretized by means of 1 ns of resolution TDCs based on deserializer primitives. The board includes a 25 MHz crystal oscillator. This clock signal is first transferred from a clock pin to a buffer in the center of the FPGA, and

then fanned out to the inner PLLs to provide two high frequency clocks of 250 MHz and 90° phase shifted. A 4-oversampling method increases the sampling frequency up to 1 GHz achieving the desired accuracy of 1 ns for PMT events. The samples produced by deserializers are sent to specific blocks called Data Recovery Units (DRUs) where the data are reorganized and the digital pulse information is computed. The system readout generates an output of 48 bits where the 8 most significant bits are used to encode the PMT identifier, the next 32 bits indicate the time-stamp and the 8 less significant bits are used to digitize the length of the pulse.

Regarding the acoustic readout system, the CLB decodes the AES3 stream and assembles it in the State Machine, which provides a data header containing general fields as data type and timing information, followed by an array of data. These arrays are composed by words of variable size, always multiple of 16 bits.

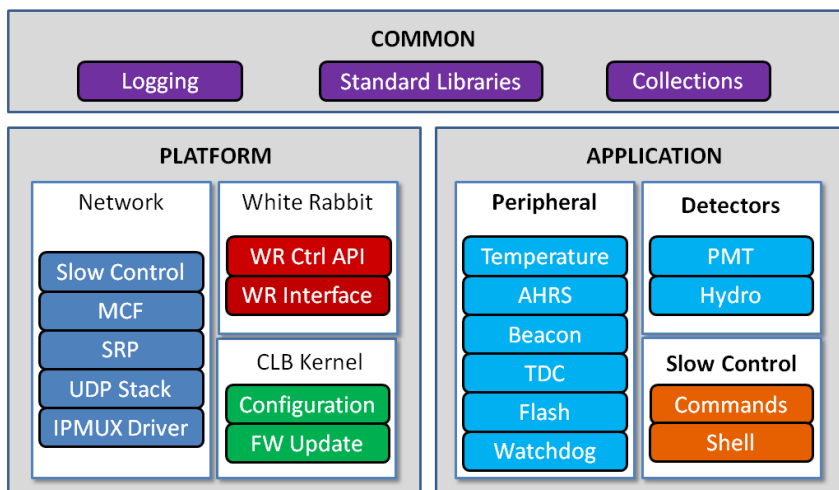
Finally the data is chopped in periods of time called time-slices. These frames start at regular and programmable intervals and are assigned a UTC time stamp uniquely identified. All time, data is related to the start of a frame using a relative offset providing by the Packet Transmission Unit (PTU). The CLB timing reference clock with a 1 ns phase precision and the UTC time are supplied by the White Rabbit PTP Core (WRPC) [6]. The CLB is connected to Ethernet via the 1000BASE-X MAC that is also incorporated in the WRPC. Both, acoustic and optic readout data is transmitted to shore via the endpoint of WRPC. This endpoint is basically a normal Ethernet MAC but it has time stamping capabilities allowing sub-nanosecond timing precision, such that it facilitates the PTP protocol. The MAC is connected to an IP/MUX packet buffer stream selector (IPMUX). This IPMUX splits the data connecting to the MAC into separate streams, based on the UDP port number. In the first place, data need to be shipped from the DOM to the shore station, so the IPMUX is mainly used as an UDP transmitter. Data received from the TDCs and acoustic subsystem are stored in the Front-End FIFO memories and consequently passed to the IPMUX. The block diagram of the firmware is shown in figure 3.



**Figure 3.** Block diagram of the firmware architecture.

## 4 Software

The control of the DOM is achieved through complex and robust embedded software running in the Lattice Mico LM32 microprocessor [7]. No operative system is used in order to reduce power consumption. The software allows multiple parties to work on it and extending it without compromising stability and clarity. The software has been layered into three main modules, named Common, Platform and Application. The Common layer contains the common functions, macros and standard libraries. The Platform layer includes the start-up code and drivers. Finally the Application layer includes the specific code for detectors, peripherals and slow control. Figure 4 shows the modular structure of the embedded software.



**Figure 4.** Embedded software architecture.

## 5 Conclusions

Several tests have been done on the CLB by the electronic group of the KM3NeT collaboration. The tests covered all the functionality of the board, and were performed separately, by focusing on the dedicated hardware, firmware and software sections. The most important tests are the time synchronization and the optical communication link. The PMT signals acquisition and acoustic modules were also analyzed in different conditions of high voltage and plugging the acoustic device to the CLB. Multiboot and the rest of the instrumentation were tested by using a shell command interface.

A thermal analysis was also performed on the board, showing two hot regions near the FPGA and near the SFP connector, having in both cases a maximum temperature of about 40°C.

Electromagnetic interference analysis was performed on the CLB. The results showed the presence of two hot spots in the center of the board due to DC-DC converters on the power supply board. These hot spots were reduced by inserting a metal plane between the two boards.

## Acknowledgments

The author acknowledges the financial support of the Spanish Ministerio de Ciencia e Innovación (MICINN), grants FPA2009-13983-C02-01, FPA2012-37528-C02-01, ACI2009-1020, Consolider MultiDark CSD2009-00064, YC-2012-10604, European Community's Sixth Framework Programme under contract n° 011937 and the Seventh Framework Programme under grant agreement n° 212525 and of the Generalitat Valenciana, Prometeo/2009/.

## References

- [1] E. de Wolf, *KM3NeT, a new generation neutrino telescope*, *Nucl. Instrum. Meth. A* **588** (2008) 86.
- [2] KM3NeT collaboration, O. Kalekin, *Optical modules for the neutrino telescope KM3NeT*, *Nucl. Instrum. Meth. A* **623** (2010) 312.
- [3] *IEEE Standard for a Precision Clock Synchronization Protocol for Network Measurements And Control Systems* (2002).
- [4] *FIDES*, <http://fides-reliability.org>.
- [5] *LatticeMico32 soft processor*, <http://www.latticesemi.com>.
- [6] *White Rabbit PTP Core*.
- [7] S. Biagi, T. Chiarusi, P. Piatelli and D. Real, *The data acquisition system of the KM3NeT detector*, in proceedings of the 34<sup>th</sup> International Cosmic Ray Conference, 30 July – 6 August, 2015, The Hague, The Netherlands [[PoS\(ICRC2015\)1172](#)].

## 6.3 Reliability Studies for KM3NeT electronics: The FIDES method

Este artículo se publicó en la revista “Proceedings of Science” en 2017. En esta revista todos sus artículos son revisados por pares. De acuerdo con la edición de ese año del SCImago Journal Rank esta revista figura con un índice de impacto de 0.115.

En el artículo se presentan los métodos de análisis de fiabilidad utilizados en KM3NeT para evaluar la electrónica de adquisición de KM3NeT. La fiabilidad de la electrónica de adquisición de KM3NeT es fundamental ya que, una vez instaladas las DUs, no es posible realizar ninguna tarea in situ. Para mejorar la fiabilidad de KM3NeT se ha utilizado el método FIDES, y en el presente artículo se describe la aplicación práctica de este método a la electrónica del DOM de KM3NeT.

## Reliability Studies for KM3NeT electronics: The FIDES method

---

**Diego Real<sup>†</sup>**

*IFIC- Instituto de Física Corpuscular, CSIC-Universitat de València,  
Parque Científico, c/ Catedrático José Beltrán, 2, E-46980, Paterna, Valencia, Spain  
E-mail: [real@ific.uv.es](mailto:real@ific.uv.es)*

**Giulia Illuminati<sup>\*</sup>**

*IFIC- Instituto de Física Corpuscular, CSIC-Universitat de València,  
Parque Científico, c/ Catedrático José Beltrán, 2, E-46980, Paterna, Valencia, Spain  
E-mail: [giulia.Illuminati@ific.uv.es](mailto:giulia.Illuminati@ific.uv.es)*

**David Calvo**

*IFIC- Instituto de Física Corpuscular, CSIC-Universitat de València,  
Parque Científico, c/ Catedrático José Beltrán, 2, E-46980, Paterna, Valencia, Spain  
E-mail: [dacaldia@ific.uv.es](mailto:dacaldia@ific.uv.es)*

**Stéphane Colonges**

*APC- AstroParticules et Cosmologie  
Université Paris VII Denis Diderot - UMR 7164, Paris, France  
E-mail: [colonges@in2p3.fr](mailto:colonges@in2p3.fr)*

**on behalf of the KM3NeT collaboration**

High reliability of electronics is crucial for those systems operating in hard conditions, in particular when in-situ maintenance is not possible, as it is the case for space or deep-sea projects. The KM3NeT infrastructure, whose first Detection Units are currently being deployed on the Mediterranean Sea at depths of 2500-3500 meters, has chosen the FIDES method as reliability technique to estimate the failure in time of the different electronics boards. In the present article, the application of the FIDES method to the electronics of the Digital Optical Modules of the KM3NeT neutrino telescope is described in detail.

*35th International Cosmic Ray Conference – ICRC217-  
10-20 July, 2017  
Bexco, Busan, Korea*

---

<sup>†</sup> Corresponding author

<sup>\*</sup> Speaker



## 1.Introduction

The KM3NeT collaboration is developing, constructing and operating a neutrino telescope [1], in the Mediterranean Sea, at a depth larger than 2500 meters. The main purpose of KM3NeT is the detection of high-energy cosmic neutrinos. To achieve this goal, a 3-D matrix of light detectors is being deployed on the seabed, which will detect the Cherenkov light emitted by faster-than-light muons generated by neutrino interactions produced in the surroundings of the detector. The arrival time of the Cherenkov photons is acquired by the photomultiplier tubes (PMTs) and the associated electronics and it used to infer the neutrino arrival direction. Thus, the performance of the detector depends on the quality of the track reconstruction. The PMTs, 31 in total, and the associated electronics are housed in high-pressure vessels made of glass, the so-called Digital Optical Modules (DOMs). The DOM is the main component of KM3NeT. The electronics inside the DOM, which includes the PMT Base, the Octopus, the Central Logic Board (CLB) and the Power Board (PB), performs the digitalization of the PMT analogue signal, the synchronization with the rest of DOMs and the communications with the on-shore station. All these functionalities need to be provided during all the DOM operation life without applying any kind of maintenance as in-situ access is not possible due to the difficulties to access to the abyssal environment. Because of this, the reliability required for the KM3NeT neutrino detector is very high. The FIDES method helps to achieve and quantify the reliability desired by KM3NeT.

### 1.1 FIDES Methodology

FIDES is the reliability methodology chosen by KM3NeT for enhancing the quality of the DOM electronics boards. The FIDES guide [2] has been produced by the FIDES group, which is composed by several European companies from the defence and aerospace sector, as they are AIRBUS, Eurocopter, Nexter Electronics, MBDA or the Thales group, which develop high reliability products. The FIDES methodology is an engineering facility composed of two different sections, one provides a handbook for predicting reliability of the electronics boards under study, and the second one, a guide for audit and control in order to calculate the impact of processes on the final reliability. It can be applied to any domain using electronics. The main objectives of the FIDES guide is to perform a realistic estimation of the electronics board reliability under study and to provide a tool that will help in the production and the control of the reliability. Moreover, it helps to find weak points on the boards that can be addressed before the board mass production is launched. The characteristics that present the FIDES methodology are:

- 1.- It provides reliability models for the electronics components, resulting in a global reliability model for boards of sub-assemblies of components.
- 2.- It takes into account the physical and technological factors that have importance in the reliability of the boards.
- 3.- It takes into account the life profile.
- 4.- It takes into account overstress (electrical, mechanical and thermal)
- 5.- It takes into account all phases processes from production definition to operation, including production and design.

The FIDES method helps in taking actions throughout the life cycle of products increasing and improving their reliability, being one of the main characteristics for the identification of the technological, physical and process factors that contribute to the reliability of the boards.



Figure 1: Schematic picture depicting the three main areas of FIDES.

The FIDES method is different from previous statistics methods in the sense that it analyses field data and gets feedback from operation data and previous models to support its validity. The models, especially those related to the process factors, has been calibrated using the experience of the group members. FIDES is free of charge and a tool developed under java distributed on [fides.reliability.org](http://fides.reliability.org). Compared to other handbooks, the FIDES handbook has been recently updated. FIDES will become soon an international standard. This method is at present widely supported in the world.

## 2. FIDES applied to KM3NeT DOM Electronics

Four are the DOM electronics boards that have passed the FIDES method in KM3NeT: The PMT base, the Octopus, the CLB and PB [3].

- The PMT base provides the HV to the PMTs and digitizes the analogue signal of them, generating a Low Voltage Differential Signal (LDVS). This signal is active when the analogue signal overpass an adjustable threshold.
- The Octopus board transfers the LDVS signals between the PMT base and the CLB.
- The CLB measures the duration of the LDVS signals by means of the TDC modules. Moreover, the CLB is responsible of the synchronization and communication inside the DOM.
- The PB provides all the needed power for the CLB and the rest of the instrumentation. On the next section, the reliability studies obtained for the four electronics boards housed in the DOM are presented.

The FIDES analysis has been applied to all the four boards in order to quantify their Failure In Time (FIT) and to find weak points that have been addressed before the production of the boards.

## 2.1 The process factor in KM3NeT. Recommendations for the expected reliability level

Prior performing the FIT evaluation, the process factor is evaluated. The process factor is an accelerating factor (multiplication of the FIT from 1 to 8) considering the impact of process on the system reliability. High reliability level is needed for KM3NeT, as the system will be installed in deep sea. The process factor obtained is 1.91 and it is the same for all the four boards. In order to reach this high reliability level, we have summarised (Table 1) the recommendation for each phase:

<i>Specifications:</i>	Reliability allocated resources in the management plan Environment perfectly known System requirement and design review planned with reliability aspect System maintenance policy defined in a document
<i>Design</i>	Skills table should be established Complete rules updated (know how capitalization) Database capitalizing feedback
<i>Production</i>	Improve the equipment final test (test coverage) Burn-in / ESS procedure and test coverage Corrective maintenance for problems appeared during production Monitor operator skills should be established Production procedure and tools validated in a document Sub-assembly protection means Quality soldering indicators Statistical process control ESD protection and ESD counters are available Configuration management to be implemented (design changes, component changes, firmware/software version...)
<i>Integration</i>	Ensure handling and packaging procedures Non conformities management, preventive and corrective actions Traceability (date code...) and configuration management Products and processes documentation Test equipment, final inspection, acceptance criteria clearly described in the QA plan or written procedures, etc. Assembly procedure clearly defined Human skills clearly identified Control the workplace environment and the production and test equipment Process change management → all changes recorded ESD protection and counter available
<i>Field operation &amp; maintenance</i>	Ensure spares handling and storage procedure are written Preventive and corrective actions implementation ensured Ensure product and non conformities traceability (failure backtracking database) Ensure inspection and test (failure detectability and analysis during operation) Commissioning → tests, final inspection → written procedure (or in QA plan) Documents available (test procedure, user manuals, etc.) Identify human resources and skills necessary Workplace environment and tools for maintenance ESD protection and counter

<i>Support</i>	Inspection dossier: acceptance criteria, inspections and tests list, associated documents Allocate infrastructure to protect equipment against degradation risk. Enough space available Define performance indicators about reliability engineering and reliability improvement process is described Reliability training and provide resource for reliability tasks Measuring devices are verified Measure the reliability of the system in operation Plan reliability activities Use FRACAS: Failure Reporting, Analysis and Corrective Action System
----------------	--

**Table 1:** Main recommendations to achieve high reliability levels in KM3NeT.

### 3. FIDES results

Using the FIDES excel tool, the “Failure In Time” (FIT) and the “Mean Time To Failure” (MTTF) have been calculated for each board. One of the first actions to be performed is the definition of the environmental conditions. That is mainly the definition of the operational temperature when the DOM is on and when it is off. The data are presented in Table 2.

Phase	Mean temperature	Max temperature	Min temperature	Delta T°	Remark
Hot case ON	17	17	17	0	The temperature is stable in the deep sea
Safe mode (OFF)	13	13	13	0	Stable temperature in deep sea

**Table 2:** Environmental conditions in KM3NeT.

The FIT is the quantity of failure per  $10^9$  hours. The total FIT is the sum of each individual component FIT. No uncertainty margin has been added. MTTF is the Mean Time To Failure (when not reparable, like electronic component). MTBF is the Mean Time Between Failures (when reparable). Over a period, the probability of failure could be calculated using the formula:

$$F(t) = 1 - R(t)$$

With  $R(t)$  the probability of a system to be still alive over a time period  $t$ .

$$F(t) = 1 - e^{-\lambda t}$$

With  $\lambda$  is the board FIT value and  $t$  is the time period duration in hours.

Product	FIT	MTTF (hours)
PMT Base	1218	820468
Octopus Large	157	6371772
Octopus Small	156	6396132
Power Board	1424	702502
CLB	417	2398985

**Table 3:** FIT and MTTF of the DOM electronics boards of KM3NeT.

In Table 3, the FIT and MTTF data obtained for the 4 types of board contained in the DOM are shown. The highest FIT value (and worst MTTF value) is obtained in the Power Board. To carry on a deeper investigation on the board, the FMECA (Failure Mode analysis) would be needed. With this method, it can be analysed if there are some non critical sections that could be excluded from the total FIT (as in fact it is the case of the nanobeacon power supply- The nanobeacon is one of the instruments housed on the DOM-, where a failure will have no effect on the performance of the detector). However, FMECA analysis is outside the scope of the present article. As summary, we can conclude that the results obtained fulfil, overall, the reliability level requested by KM3NeT.

## 4. Conclusions

In this article, the FIDES method and the result of its application to the KM3NeT DOM electronics has been presented. The main recommendations for acquiring the desired reliability level for an infrastructure where maintenance during the operation life will not be possible, have been taken into account. Moreover, the FIDES result for each DOM board have been also shown.

## Acknowledgment

The authors acknowledge the financial support of the Spanish Ministerio de Ciencia e Innovación (MICINN), grants FPA2009-13983-C02-01, FPA2012-37528-C02-01, ACI2009-1020, Consolider MultiDark CSD2009-00064, YC-2012-10604, European Community's Sixth Framework Programme under contract n° 011937 and the Seventh Framework Programme under grant agreement n° 212525 and of the Generalitat Valenciana, Prometeo/2009/

## References

- [1] Letter of Intent for KM3NeT 2.0, KM3NeT Collaboration, J. of Phys. G: Nucl. and Partic. Phys. 43, 8, arXiv:1601.07459 [astro-ph.IM]
- [2] FIDES guide 2009 Edition A September 2010 Reliability Methodology for Electronic Systems  
[http://www.fides-reliability.org/files/UTE\\_Guide\\_FIDES\\_2009\\_Ed\\_A\\_EN.pdf](http://www.fides-reliability.org/files/UTE_Guide_FIDES_2009_Ed_A_EN.pdf)
- [3] D. Real, D. Calvo "Digital optical module electronics of KM3NeT" Phys. Part. Nuclei (2016) 47: 918. doi:10.1134/S1063779616060216

## 6.4 Digital Optical Module Electronics of KM3NeT

Este artículo se publicó en la revista “Physics of particles and nuclei” en 2016. En esta revista todos sus artículos son revisados por pares. De acuerdo con la edición de ese año del Journal Citation Reports esta revista figura con un índice de impacto de 0,681 y se encuentra en el cuarto cuartil del área “PHYSICS, PARTICLES & FIELDS ”. En el artículo se presenta un avance de la electrónica de adquisición de KM3NeT.

# Digital Optical Module Electronics of KM3NeT<sup>1, 2</sup>

D. Real\* and D. Calvo

On behalf of the KM3NeT Collaboration

*Instituto de Física Corpuscular, IFIC (CSIC, UV) 46980 Paterna, Spain*

*\*e-mail: real@ific.uv.es*

**Abstract**—The KM3NeT neutrino telescope is being built on the Mediterranean sea and, once completed, it will be composed by tens of thousands of glass spheres (nodes) including each 31 of small photocathode (3"). The readout and data acquisition system of KM3NeT has to collect, treat and send to shore, in an economic way, the enormous amount of data produced by the photomultipliers and at the same time to provide time synchronization between each node at the level of 1 ns. It is described in the present article all the electronics developed for achieving this goal.

**DOI:** 10.1134/S1063779616060216

## 1. INTRODUCTION

KM3NeT is a future European research facility in the Mediterranean Sea which will house a neutrino telescope of cubic kilometer scale. Cherenkov light from neutrino induced secondary particles will be detected by an array of optical modules consisting in high pressure resistant glass vessels with photomultipliers inside. This vessel is called the Digital Optical Module (DOM) and it is composed of 31 small 3 inch PMTs distributed around the glass sphere, which collects the Cherenkov light and transform it into electronic signals. Figure 1 shows the Digital Optical Module and the KM3NeT overview.

The PMTs are suspended in a foam support structure: 19 in the lower hemisphere and 12 in the upper hemisphere. Each PMT has its own adjustable high voltage supply integrated in the PMT base. The PMTs collect the Cherenkov light and convert it into electronic signals. In order to translate these signals into the arrival time of the photons, they are processed by Time to Digital Converters (TDCs) core embedded in the Field Programmable Gate Array (FPGA) of the Central Logic Board (CLB). The CLB integrates the White Rabbit Protocol, a fully deterministic Ethernet-based network for general purpose data transfer and synchronization, that allows to synchronize all the KM3NeT DOMs with 1 ns resolution. The data provided by the PMT bases are collected and distributed to the CLB by means of two boards (one for each hemisphere), the so called Octopus Boards. It also contains the electronic and photonic components for an optical serial link to the shore. All necessary DC power is provided by the Power Board (PB). An alu-

minium structure provides heat conduction between the electronics inside and the exterior of the sphere. In Fig. 2 a schematic view of the DOM is shown.

## 2. PHOTOMULTIPLIER BASE

The PMT base is in charge of discretizing the signal read by the PMT and to provide the High Voltage (HV) for the PMT. The PCB contains a pre-amplifier, a comparator (Time over Threshold) and an identifier module. Connection to the PMT is done by flying leads with a PCB that has a diameter of 38 mm. Every PMT must give the same output signal when it is hit by a single photon. The gain of a PMT depends on the supplied high voltage. The HV for each PMT is individually adjustable from 800 to 1400 V. Consequently

each PMT gets its own HV circuit board.  $I^2C$  protocol is used to be able to program the PMT base and to change the HV. The power consumption of each PMT base is around 4.5 mW. An additional function of the PMT base is the digitisation of the analogue output signal of the PMT. The output signal is converted from a charge signal to a voltage signal, followed by a conversion to a digital level by a comparator, resulting in a Time Over Threshold (TOT) signal. The comparator can be adjusted to the required TOT value using  $I^2C$  protocol. The TOT signal is transferred to the DOM logic by a LVDS connection. To identify the PMT base an ID circuit is added. The analogue and digital signal conversion functionality of the PMT base is performed in an ASIC. The PMT base diagram is shown in Fig. 3.

### 2.1. PMT Base ASIC

The DOM is very crowded and there is little available space for the 31 PMTs and the PMT-bases. In order to minimize space, cost and power, an ASIC has

<sup>1</sup> Talk at The International Workshop on Prospects of Particle Physics: "Neutrino Physics and Astrophysics" February 1–8, 2015, Valday, Russia.

<sup>2</sup> The article is published in the original.

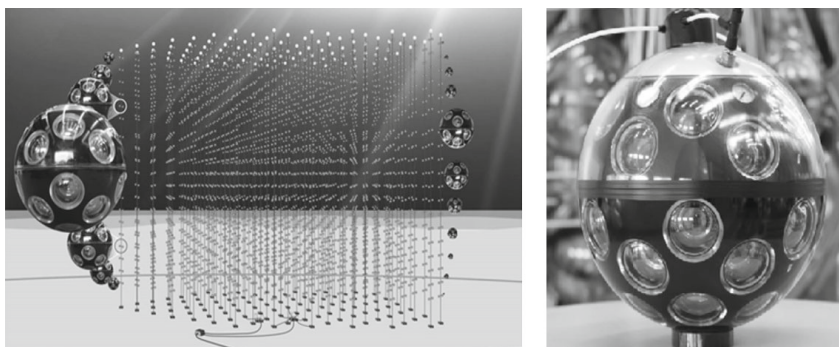


Fig. 1. Left: KM3NeT general overview. Right: Digital Optical Module.

been designed to read out the PMT. The PMT-base houses the PROMiS ASIC. A Cockcroft-Walton HV supply circuit on the base can be adjusted via the CoCo ASIC to provide a gain of  $10^6$  for the PMT in each case. The specifications of both ASICs are presented in Tables 1 and 2.

**2.1.1. Promis—analogue part description.** The analogue part of the PROMiS chip consists of a band gap, bias block, preamplifier, discriminator, analogue buffer and LVDS driver (Fig. 6). Two 8-bit DACs: one to adjust the threshold level of the comparator, and another one to adjust the level of HV circuit. The preamplifier boosts the signal from the PMT. The comparator discriminates against a threshold level, which in turn specifies the time over threshold (ToT, shown in Fig. 6). This pulse is sent on an LVDS line (0.4 m length) for digitization with an accuracy of  $<1$  ns and finally, the digitized information is sent to shore for

further processing. The Bandgap produces a stable 1.2 V reference, from which all the other bias voltages and currents in the bias block are derived. The Pre-amp is a 2-stage charge amplifier (feedback:  $R_f = 15 \text{ k}\Omega$   $k \text{ Cf} = 300 \text{ fF}$ ), which is biased at 1 V. A single stage comparator is designed to discriminate the output of the charge amplifier against a threshold value. The threshold voltage of the comparator can be set via  $I^2C$ . Conventional design is used for the LVDS circuit driving a  $100 \Omega$  kapton based transmission line, with common-mode feedback circuit. The CM voltage is set internally on chip to 1.2 V. To characterize the PMT and analyse the PMT signal, the preamplifier output is fed to an analogue buffer.

**2.1.2. Promis—digital part description.** The digital part consists of a clock generator, a power on reset (POR), an  $I^2C$  decoder and an OTP (one-time-pro-

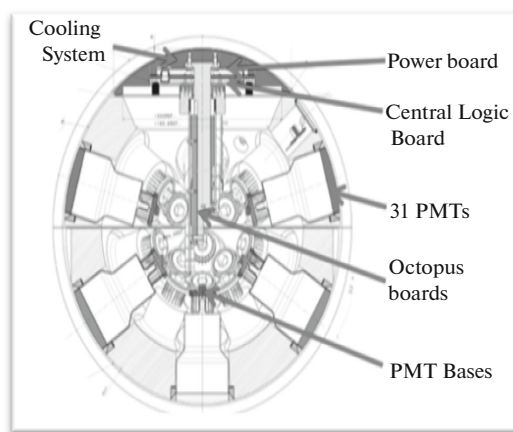


Fig. 2. DOM: Position of the Power Board, Central Logic Board, Octopus Board and PMT Bases.

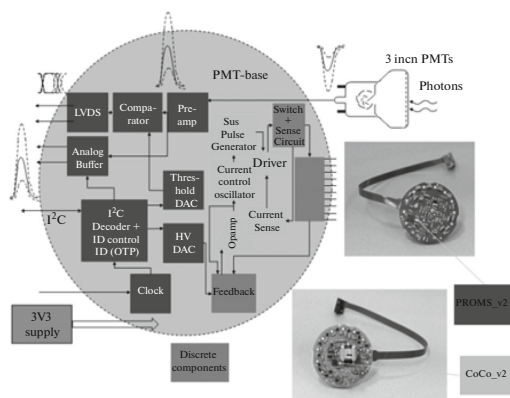


Fig. 3. PMT Bases diagram.



**Table 1.** Specifications PROMiS chip

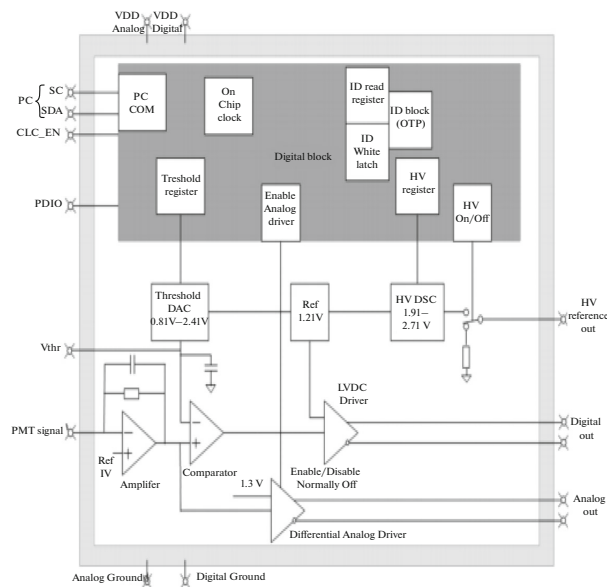
Time resolution (for a single photon, photomultiplier + electronics)	<2 ns
Two-hit time separation	<25 ns
Power consuption	35 mW
Supply voltage, Technology	3.3 V, 0.35 $\mu$ CMOS AMS
Comparator Threshold Adjustment	8 bits (0.8 V–2.4 V)
HV feedback control	8 bits (0.8 V–2.4 V)
Slow-Control Communication, Digital and Analog Output	$I^2C$ , LVDS and Analog buffer respectively

**Table 2.** Specifications CoCo chip

Pulse output frequency	<50 kHz (max.)
Pulse width	<6.5 $\mu$ s (max.)
Power consuption	<1 mW
Supply voltage, Technology	3.3 V, 0.35 $\mu$ CMOS AMS
Current sense	100 mV over 1.5 $\Omega$
Opamp reference (internal)	1.2 V

grammable) memory block with controller as shown in the block diagram Fig. 6. The clock generator generates a frequency of 10 MHz (30% variations due to process voltage and temperature). The accuracy of the clock is not very critical as it only samples a slow 250 kHz  $I^2C$  SCL (clock) line. The  $I^2C$  slave and the

OTP controller was implemented using classical digital ASIC flow. Clock enable signal is provided to shut off the clock and save power. A facility to test the entire analog chain through  $I^2C$  is provided. The HV circuit and analog buffer can be turned on/off using  $I^2C$ .



**Fig. 4.** Diagram of the PROMiS chip.

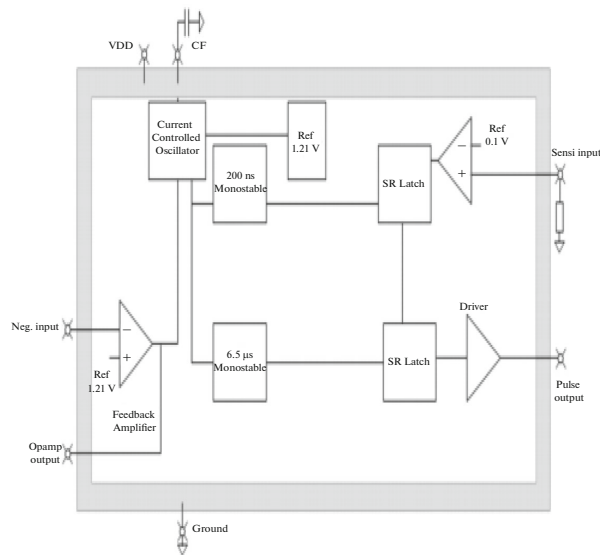


Fig. 5. Block Diagram of the CoCo chip.

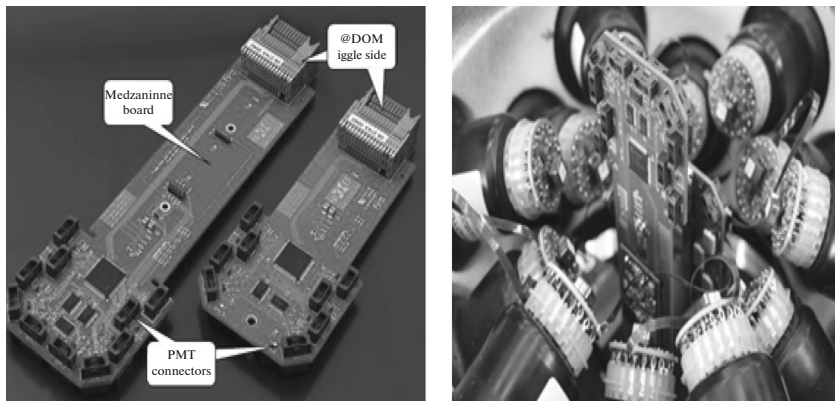


Fig. 6. Left: Large and Short Octopus. Right: Detail of the Octopus inserted in the DOM.

**2.1.3. CoCo Cockroft Walton multiplier feedback control ASIC.** The PMT needs stable high voltage for its operation. The gain of the PMT is linear with the HV applied. The HV is generated using a CW multiplier circuit. An autotransformer with turns ratio of 12 is used to couple energy inductively from the 3.3 V supply to the CW circuit. The CW circuit has a high resistive feedback circuit. The autotransformer is switched using an external switch. The ASIC supplies pulses to the switch controlling the autotransformer. The feedback of the CW circuit is controlled by the-

ame ASIC. The pulses are of a definite width of 6.5 s. The frequency of these pulses is controlled by the feedback of the HV circuit. The feedback voltage is converted to a current that is used to (dis)charge a capacitor. The magnitude of the current and the value of the external capacitor determine the frequency. The charging and discharging triangular wave across the capacitor is also used to generate internal clocks. On each rising edge of the clock, another pulse is generated with an on-time of 6.5  $\mu$ s. For example, when the charge in the HV circuit is empty, the ASIC issues

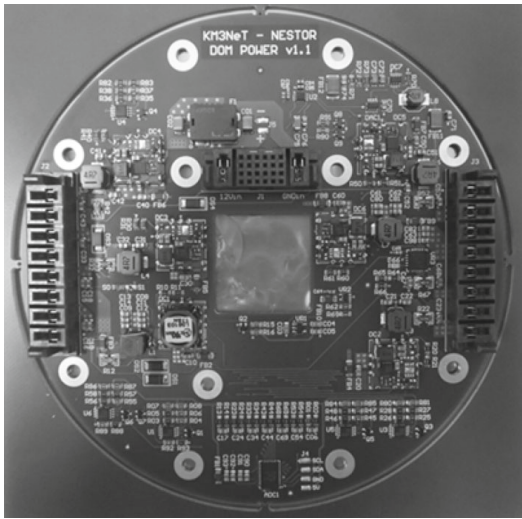


Fig. 7. Picture of the first prototype of the DOM Power Board.

pulses at the highest frequency of 50 kHz. When the HV reaches the desired value (set by the HVDAC in PROMiS through  $I^2C$ ), the frequency is reduced (around 200 Hz). The current sense input also helps to avoid the saturation of the autotransformer in case of a short circuit. Block diagram of CoCo is presented in Fig. 5.

### 3. THE OCTOPUS BOARD

Within each hemisphere, the LDVS signals from the PMT bases are collected on a custom electronics board (Fig. 6), called the Octopus board and transferred to the DOM central logic board. The boards also provide connection for the electrical power to the PMT bases and the  $I^2C$  communication control. For each PMT, the electrical power can be switched on/off individually by the slow control and in case of overload of a PMT the power will be switched off automatically. This can be monitored by the Fault Flag (FFLG). A clock enabled signal to the PMTs for the  $I^2C$  communication avoids digital interference.

**3.1.4. Functional description.** The Octopus V4 board acts as a hub inside the DOM. It merges all the PMT signal connections, controls the power supply and re-directs the  $I^2C$  communication. At one side the Octopus V4 board is connected to the PMTs and the piezo element. It distributes the power, clock enable and  $I^2C$  communication to the PMTs and piezo element. It acts as an input for the differential

signal from the PMTs and piezo element. At the other side the Octopus V4 board is connected to the CLB.

The power and the  $I^2C$  bus are delivered from the CLB to the Octopus V4 board. The differential signal is delivered to the CLB. The main functionalities of the board are listed below:

1. To distribute and measure the 3V3 power
2. To distribute the 5V power
3. To multiplex the  $I^2C$  channels
4. To control of the clock enable line
5. To transport the differential signals from the TDC channels and piezo
6. To provide an external Nreset signal

### 4. POWER BOARD

For an efficient transfer of the electrical power the voltage level must be high and the current low, because the power loss depends on the  $I^2R$  of the cable. In addition, the different electronics of the DOM require many different voltage levels for their performance. Therefore, the power conversion board inside the DOM derives all different client voltage levels from an input voltage of 12 V. Modern converters at high frequency are used to obtain a high efficient power conversion. To protect the other electronics inside the DOM against possible high frequency noise interference, the converter board is located in a shielded part of the cooling mushroom. On the other hand, cooling of the board will be more efficient at this location. The PB is shown in Fig. 7.

The PB is attached to the CLB using 3 board-to-board connectors (J1, J2, J3). It receives power via J1 at nominal voltage of 12V, and produces six regulated power rails (1 V, 1.8 V, 2.5 V, 3.3 V, 3.3 V-PMT, 5 V) to power various electronic modules within the DOM via J2 and J3. It also provides a high voltage (0 V to 30 V, 5 mA) programmable (via an  $I^2C$  interface) voltage source for the nanobeacon module, via J1. Apart from the power rails, the PB has additional connections for  $I^2C$  communication as well as remote sense and diagnostic signals.

### 5. CENTRAL LOGIC BOARD

The DOM Central Logic Board (CLB) is the main electronics board in the readout chain of KM3NeT. The LDVS signals generated by the PMT bases and collected and distributed by the Octopus boards arrive to the CLB where they are discretized by means of 1ns resolution TDCs. The TDC data are sent on-shore after being organized and timestamped at the CLB. The CLB takes care also of the read-out of several instruments, as it is the case of the compass, tiltmeter and temperature sensor, all of them integrated on the same CLB PCB, the piezo, the nanobeacon and

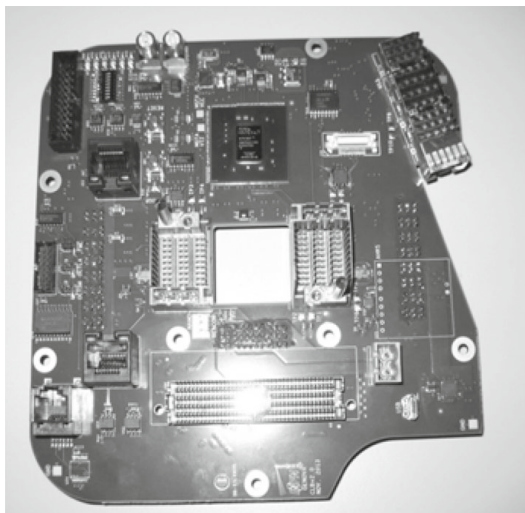


Fig. 8. Picture of the DOM Central Logic Board.

the acoustic hydrophone. In order to synchronize the DOMs in KM3NeT, the CLB integrates the White Rabbit Protocol. It provides sub-nanosecond accuracy and picoseconds precision of synchronization for large distributed systems (more than 1000 nodes over optical fibre and copper lengths of up to 100 km). By using White Rabbit (WR), we are able to achieve precision time-tag measured data and trigger data taking in large installations and, at the same time, the same network can be used for data transmission. The key technologies used are Synchronous Ethernet (SyncE) and Precision Time Protocol (PTP). The main component of the CLB is a Kintex FPGA. This device also allows the reconfiguration of the firmware of the CLB. It is feasible to store up to four FPGA images in a SPI memory, three of them reconfigurable. The non-reconfigurable provides a safe start for the FPGA in case of corruption of the 3 reconfigurable images, being possible to choose to boot the FPGA with any of the four. Figure 6 shows the CLB board containing the FPGA where the readout and communication systems are implemented. The Kintex-7 FPGA is an FPGA family providing very low power consumption allowing a total CLB power consumption below 4 watts. The control of the CLB is achieved through embedded software running in an LM32, an open source firmware microprocessor from Lattice. No operative system is used in order to reduce power consumption. The CLB contains two LM32 CPUs. One of them resides in the WR core which is dedicated to handle the PTP traffic and controlling the Phase Locked Loops (PLL) that are part of the timing system. The other CPU (2nd LM32) takes care of the slow control com-

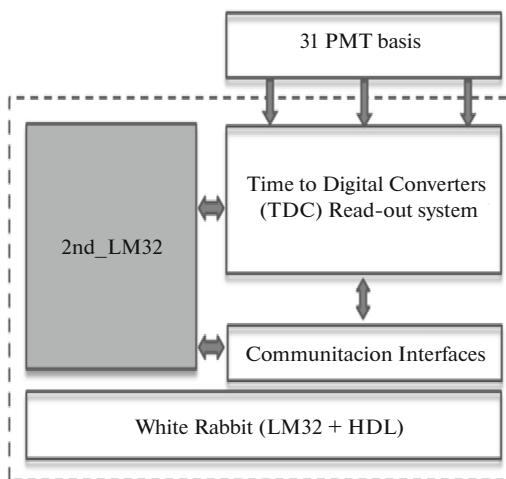


Fig. 9. Block diagram of the CLB firmware.

munication with the shore station. The block diagram of the CLB firmware is shown in Fig. 9.

## 6. TDC IMPLEMENTATION

The oversampling method uses a sampling frequency significantly higher than twice the bandwidth (or highest frequency) of the signal being sampled. For the KM3NeT readout system, the 'significantly higher' sampling frequency is obtained using different edges of multiple phase-shifted clocks. This method is called asynchronous oversampling because the clocks used to create the sampling frequency are nominally equal to the data stream accuracy. High-speed phase-shifted clocks are generated from a slow system clock provided by a local clock oscillator placed on the CLB. A PLL inside the FPGA generates two clock phases (CLK0 and CLK90). These two phases are routed to a deserializer primitive, which is inside the input/output blocks of the FPGA. The generated CLK0 and CLK90 clocks make possible to oversample an incoming data stream on four edges, increasing four times the sampling frequency. The function of the two extra clocks combination is shown in Fig. 10.

## 7. CLB READOUT FIRMWARE

TDC channels were designed in a Xilinx Kintex-7. Because of the programmable characteristic of an FPGA, a TDC readout implemented in this device has flexible characteristics. Here, a simplified TDC is designed to verify the idea of deserializing the raw data by means of dedicated input/output blocks of the

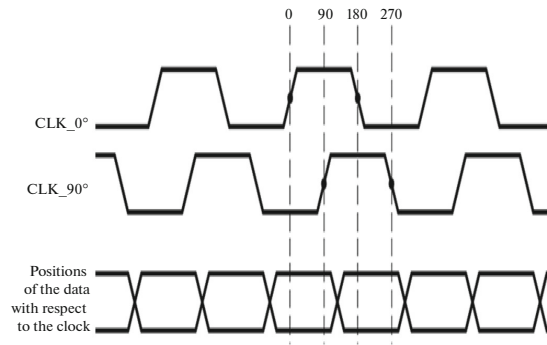


Fig. 10. Oversampling technique using two phase-shifted clocks.

FPGA. The CLB board includes a 25 MHz crystal oscillator, the clock signal is first transferred from a clock pin to a buffer in the centre of the FPGA, and then fanned out to the inner PLLs to provide two high frequency clocks of 250 MHz and 90° phase shifted. 4-oversampling method increases the sampling frequency up to 1 GHz achieving the desired accuracy of 1 ns. The samples produced by deserializers are sent to specific blocks called Data Recovery Units (DRUs) where the data are re-organized and the digital pulse information is computed. The system readout generates an output of 48 bits where the 8 most significant bits are used to encode the PMT identifier, the next 32 bits indicate the time-stamp and the 8 less significant bits are used to digitize the length of the pulse. In order to find tracks within the detector volume, the data is chopped in periods of time called frames or time-slices. Frames start at regular (programmable) intervals. Each frame is assigned a UTC time stamp and it is therefore uniquely identified. Data are related to the start of a frame using a relative offset providing by the Packet Transmission Unit (PTU). The CLB

timing reference clock with a 1 ns phase precision and the UTC time are supplied by the White Rabbit PTP Core (WRPC) [8] that is implemented in the firmware. The CLB is connected to Ethernet via the 1000BASE-X MAC that is also incorporated in the WRPC. TDC data are transmitted to shore via the endpoint of WRPC. This endpoint is basically a normal Ethernet MAC but it has time stamping capabilities allowing sub-nanosecond timing precision, such that it facilitates the PTP (IEEE588) protocol. The MAC is connected to an IP/UDP packet buffer stream selector (IPMUX). This IPMUX splits the data connecting to the MAC into separate streams, based on UDP port number. In the first place, the data needs to be shipped from the DOM to the shore station, so IPMUX is mainly used as a UDP transmitter. Data that are received from the TDCs are stored in the Front-End FIFO memories where they are read by the PTU and passed to IPMUX. More functions have been integrated into the TDC firmware, such the high-rate veto function to avoid overloading the communication bandwidth and multihit function to process pulse widths larger than 255 ns. 31 TDC channels have been implemented, but the appropriate number of channels can be chosen according to the requirements of each DOM. The current implementation also offers a wide variety of interface options like an enable interface, which allows enabling or disabling remotely the TDC channels using the embedded software based on the LM32 microprocessor.

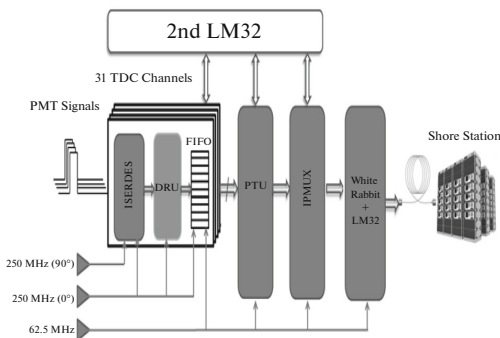


Fig. 11. Complete readout architecture.

## 8. DOM POWER BUDGET

In Table 3 the power consumption breakdown of the DOM electronics is shown. The component with the highest power consumption is the CLB, with 2/3 of the total power budget. The FPGA of the CLB and the SFP are the main power consumers.

**Table 3.** DOM power budget

Power budget		
board	sub component	power, W
Power Board		0.72
Central Logic Board		4.715
	FPGA (Kintex)	2.25
	SFP	1.5
	Clock conditioner	0.5
	Nanobeacon	0.25
	Temp + humidity	0.015
	AHRS (tilt and compass)	0.2
Octopus board Short		0.02078
	OM $I^2C$ circuit	0.02
	OM $I^2C$ circuit	0.00078
Octopus board Large		0.02078
	OM $I^2C$ circuit	0.02
	OM $I^2C$ circuit	0.00078
PMT 31x		1.05
	HV	0.004
	Detection	0.03
Digital Piezo		0,5
Total Budget		7.03

## ACKNOWLEDGMENTS

This research was supported, among others, by the Spanish MINECO project AYA2012-38491-C02-01 and the Generalitat Valenciana project PROMETEOII/2014/057

## REFERENCES

1. M. de Jong, "KM3NeT: The next generation neutrino telescope," *Proceedings of the 33rd ICRC*, Rio de Janeiro, 2013.
2. M. Circella, "KM3NeT: A second-generation neutrino telescope in the Mediterranean Sea," *Proceedings of the 33rd ICRC*, Rio de Janeiro, 2013.
3. M. Circella, "The digital optical module (DOM) for the KM3NeT detector," *Proceedings of the 33rd ICRC*, Rio de Janeiro, 2013.
4. D. Real, "The electronics readout and data acquisition system of the KM3NeT neutrino telescope node," *Proceedings of the VLVnT*, Stockholm, 2013.
5. P. Timmer, "Very low power, high voltage base for a photo multiplier tube for the KM3NeT deep sea neutrino telescope," *Proceedings of the TWEPP*, Aachen, 2010.
6. A. Belias, "Design and development of the power supply board within the digital optical module in KM3NeT," *Proceedings of TIPP*, Amsterdam, 2014.
7. P. Musico, "The central logic board for the optical module of the KM3NeT detector," *Proceedings of TIPP*, Amsterdam, 2014.
8. D. Gajanana, "ASIC design in the KM3NeT detector," *Proceedings of TIPP*, Oxford, 2012.

## 6.5 The KM3NeT Digital Optical Module electronics: hardware, firmware and software

Este artículo se publicó en la revista “Journal of Astronomical Telescopes Instruments and Systems” en 2019. En esta revista todos sus artículos son revisados por pares. De acuerdo con la edición del año 2018 del Journal Citation Reports esta revista figura con un índice de impacto de 3.143 y se encuentra en el primer decil del área “ENGINEERING, AEROSPACE ”.

En el artículo se presenta en detalle la electrónica de adquisición de KM3NeT, diseñada para una sincronización de un nanosegundo entre los relojes de todos los módulos ópticos de la matriz de adquisición durante la vida útil del experimento. Las diferentes tarjetas (CLB, Power Board, Base de los PMTs y SCBs) se presentan, incluyéndose además la arquitectura *firmware* y *software* utilizada, el consumo de potencia del módulo óptico, limitado a 7 W, y los resultados de los estudios de fiabilidad realizados.



# Journal of Astronomical Telescopes, Instruments, and Systems

AstronomicalTelescopes.SPIEDigitalLibrary.org

## KM3NeT front-end and readout electronics system: hardware, firmware, and software

Sebastiano Aiello  
Fabrizio Ameli  
Michel Andre  
Georgios Androulakis  
Marco Anghinolfi  
Gisela Anton  
Miquel Ardidi  
Julien Aublin  
Christos Bagatelas  
Giancarlo Barbarino  
Bruny Baret  
Suzan Basegmez du Pree  
Anastasios Belias  
Meriem Bendahman  
Edward Berbee  
Ad M. van den Berg  
Vincent Bertin  
Vincent van Beveren  
Simone Biagi  
Andrea Biagioni  
Matthias Bissinger  
Pascal Bos  
Jihad Boumaaza  
Simon Bourret  
Mohammed Bouta  
Gilles Bouvet  
Mieke Bouwhuis  
Cristiano Bozza  
Horea Brânzaș  
Max M. Briel  
Marc Bruchner  
Ronald Bruijn  
Jurgen Brunner  
Ernst-Jan Buis  
Raffaele Buompane  
Jose Busto  
David Calvo  
Antonio Capone  
Silvia Celli  
Mohamed Chabab  
Nhan Chau  
Silvio Cherubini  
Vitaliano Chiarella  
Tommaso Chiarusi  
Marco Circella  
Rosanna Cocimano  
Joao A. B. Coelho

Alexis Coleiro  
Marta C. Molla  
Stephane Colonges  
Rosa Coniglione  
Paschal Coyle  
Alexandre Creusot  
Giacomo Cuttone  
Antonio D'Amico  
Antonio D'Onofrio  
Richard Dallier  
Mauro De Palma  
Irene Di Palma  
Antonio F. Díaz  
Didac Diego-Tortosa  
Carla Distefano  
Alba Domi  
Roberto Donà  
Corinne Donzaud  
Damien Dornic  
Manuel Dörr  
Mora Durocher  
Thomas Eberl  
Thijs van Eeden  
Imad El Bojaddaini  
Hassnae Eljarrari  
Dominik Elsaesser  
Alexander Enzenhöfer  
Paolo Fermani  
Giovanna Ferrara  
Miroslav D. Filipović  
Luigi A. Fusco  
Deepak Gajanana  
Tamas Gal  
Alfonso Garcia Soto  
Fabio Garufi  
Lucio Gialanella  
Emidio Giorgio  
Sara R. Gozzini  
Rodrigo Gracia  
Kay Graf  
Dario Grasso  
Timothée Grégoire  
Giuseppe Grella  
Daniel Guderian  
Carlo Guidi  
Steffen Hallmann  
Hassane Hamdaoui

Hans van Haren  
Aart Heijboer  
Amar Hekalo  
Juan J. Hernández-Rey  
Jannik Hofestädt  
Feifei Huang  
Enrique H. Santiago  
Giulia Illuminati  
Clancy W. James  
Peter Jansweijer  
Martijn Jongen  
Maarten de Jong  
Paul de Jong  
Matthias Kadler  
Piotr Kalaczyński  
Oleg Kalekin  
Uli F. Katz  
Nafis R. Khan Chowdhury  
Frits van der Knaap  
Els N. Koffeman  
Paul Kooijman  
Antoine Kouchner  
Michael Kreter  
Vladimir Kulikovskiy  
Robert Lahmann  
Giuseppina Larosa  
Remy Le Breton  
Francesco Leone  
Emanuele Leonora  
Giuseppe Levi  
Massimiliano Lincetto  
Miles Lindsey Clark  
Alessandro Lonardo  
Fabio Longhitano  
Daniel Lopez-Coto  
Giuliano Maggi  
Jerzy Mańczak  
Karl Mannheim  
Annarita Margiotta  
Antonio Marinelli  
Christos Markou  
Gregory Martignac  
Lilian Martin  
Juan A. Martínez-Mora  
Agnese Martini  
Fabio Marzaioli  
Safaa Mazzou

Rosa Mele  
Karel W. Melis  
Pasquale Migliozi  
Emilio Migneco  
Piotr Mijkowski  
Luis S. Miranda  
Carlos M. Mollo  
Mauro Morganti  
Michael Moser  
Abdelilah Moussa  
Rasa Muller  
Paolo Musico  
Mario Musumeci  
Lodewijk Nauta  
Sergio Navas  
Carlo A. Nicolau  
Christine Nielsen  
Brian Ó Fearraigh  
Mukharbek Organokov  
Angelo Orlando  
Vasilis Panagopoulos  
Gogita Papalashvili  
Riccardo Papaleo  
Cosimo Pastore  
Gabriela E. Pávlaš  
Giuliano Pellegrini  
Carmelo Pellegrino  
Mathieu Perrin-Terrin  
Paolo Piattelli  
Camiel Pieterse  
Konstantinos Pikounis  
Ofelia Pisanti  
Chiara Poirè  
Georgia Polydefki  
Vlad Popa  
Maarten Post  
Thierry Pradier  
Gerd Pühlhofer  
Sara Pulvirenti  
Liam Quinn  
Fabrizio Raffaelli  
Nunzio Randazzo  
Antonio Rapicavoli  
Soebur Razaque  
Diego Real  
Stefan Reck  
Jonas Reubelt

Giorgio Riccobene  
Marc Richer  
Louis Rigalleau  
Alberto Rovelli  
Ilenia Salvadori  
Dorothea F. E. Samtleben  
Agustin Sánchez Losa  
Matteo Sanguineti  
Andrea Santangelo  
Domenico Santonocito  
Piera Sapienza  
Jan-Willem Schmelling  
Jutta Schnabel  
Virginia Sciacca  
Jordan Seneca  
Irene Sgura  
Rezo Shanidze  
Ankur Sharma  
Francesco Simeone  
Anna Sinopoulou  
Bernardino Spisso  
Maurizio Spurio  
Dimitris Stavropoulos  
Jos Steijger  
Simona M. Stellacci  
Bruno Strandberg  
Dominik Stransky  
Mauro Taiuti  
Yahya Tayalati  
Enrique Tenllado  
Tarak Thakore  
Paul Timmer  
Steven Tingay  
Ekaterini Tzaniarudaki  
Dimitrios Tzanetatos  
Veronique Van Elewycq  
Federico Versari  
Salvo Viola  
Daniele Vivolo  
Gwenhael de Wasseige  
Joern Wilms  
Dafaj Wojaczyński  
Els de Wolf  
Dmitry Zaborov  
Angela Zegarelli  
Juan D. Zornoza  
Juan Zúñiga

Sebastiano Aiello et al., "KM3NeT front-end and readout electronics system: hardware, firmware, and software," *J. Astron. Telesc. Instrum. Syst.* 5(4), 046001 (2019), doi: 10.1117/1.JATIS.5.4.046001.



# KM3NeT front-end and readout electronics system: hardware, firmware, and software

Sebastiano Aiello,<sup>a</sup> Fabrizio Ameli,<sup>b</sup> Michel Andre,<sup>c</sup> Giorgos Androulakis,<sup>d</sup> Marco Anghinolfi,<sup>e</sup> Gisela Anton,<sup>f</sup> Miquel Ardid,<sup>g</sup> Julien Aublin,<sup>h</sup> Christos Bagatelas,<sup>d</sup> Giancarlo Barbarino,<sup>i,j</sup> Bruny Baret,<sup>h</sup> Suzan Basegmez du Pree,<sup>k</sup> Anastasios Belias,<sup>d</sup> Meriem Bendahman,<sup>l</sup> Edward Berbee,<sup>k</sup> Ad M. van den Berg,<sup>m</sup> Vincent Bertin,<sup>n</sup> Vincent van Beveren,<sup>k,\*</sup> Simone Biagi,<sup>o</sup> Andrea Biagioni,<sup>b</sup> Matthias Bissinger,<sup>f</sup> Pascal Bos,<sup>k</sup> Jihad Boumaaza,<sup>l</sup> Simon Bourret,<sup>h</sup> Mohammed Bouta,<sup>p</sup> Gilles Bouvet,<sup>q</sup> Mieke Bouwhuis,<sup>k</sup> Cristiano Bozza,<sup>r</sup> Horea Brânzaș,<sup>s</sup> Max M. Briel,<sup>k,t</sup> Marc Bruchner,<sup>f</sup> Ronald Bruijn,<sup>k,t</sup> Jurgen Brunner,<sup>n</sup> Ernst-Jan Buis,<sup>u</sup> Raffaele Buompane,<sup>l,v</sup> Jose Busto,<sup>n</sup> David Calvo,<sup>w,\*</sup> Antonio Capone,<sup>x,b</sup> Silvia Celli,<sup>b,x,y</sup> Mohamed Chabab,<sup>z</sup> Nhan Chau,<sup>h</sup> Silvio Cherubini,<sup>o,aa</sup> Vitaliano Chiarella,<sup>ab</sup> Tommaso Chiarusi,<sup>ac</sup> Marco Circella,<sup>ad</sup> Rosanna Cocimano,<sup>o</sup> Joao A. B. Coelho,<sup>n</sup> Alexis Coleiro,<sup>w</sup> Marta C. Molla,<sup>h,w</sup> Stephane Colonges,<sup>h</sup> Rosa Coniglione,<sup>o</sup> Paschal Coyle,<sup>n</sup> Alexandre Creusot,<sup>h</sup> Giacomo Cuttone,<sup>o</sup> Antonio D'Amico,<sup>k</sup> Antonio D'Onofrio,<sup>i,v</sup> Richard Dallier,<sup>q</sup> Mauro De Palma,<sup>ad,ae</sup> Irene Di Palma,<sup>b,x</sup> Antonio F. Díaz,<sup>af</sup> Didac Diego-Tortosa,<sup>g</sup> Carla Distefano,<sup>o</sup> Alba Domi,<sup>e,n,ag</sup> Roberto Donà,<sup>ac,ah</sup> Corinne Donzaud,<sup>h</sup> Damien Dornic,<sup>n</sup> Manuel Dörr,<sup>ai</sup> Mora Durocher,<sup>o,y</sup> Thomas Eberl,<sup>f</sup> Thijs van Eeden,<sup>k</sup> Imad El Bojaddaini,<sup>p</sup> Hassnae Eljarrari,<sup>l</sup> Dominik Elsaesser,<sup>ai</sup> Alexander Enzenhöfer,<sup>n</sup> Paolo Fermani,<sup>b,x</sup> Giovanna Ferrara,<sup>o,aa</sup> Miroslav D. Filipović,<sup>aj</sup> Luigi A. Fusco,<sup>h</sup> Deepak Gajanana,<sup>k</sup> Tamas Gal,<sup>f</sup> Alfonso Garcia Soto,<sup>k</sup> Fabio Garufi,<sup>i,j</sup> Lucio Gialanella,<sup>i,v</sup> Emidio Giorgio,<sup>o</sup> Sara R. Gozzini,<sup>w</sup> Rodrigo Gracia,<sup>k</sup> Kay Graf,<sup>f</sup> Dario Grasso,<sup>ak</sup> Timothee Grégoire,<sup>h</sup> Giuseppe Grella,<sup>f</sup> Daniel Guderian,<sup>ai</sup> Carlo Guidi,<sup>e,ag</sup> Steffen Hallmann,<sup>f</sup> Hassane Hamdaoui,<sup>l</sup> Hans van Haren,<sup>am</sup> Aart Heijboer,<sup>k</sup> Amar Hekalo,<sup>ai</sup> Juan J. Hernández-Rey,<sup>w</sup> Jannik Hofestadt,<sup>f</sup> Feifei Huang,<sup>an</sup> Enrique H. Santiago,<sup>k</sup> Giulia Illuminati,<sup>w</sup> Clancy W. James,<sup>ao</sup> Peter Jansweijer,<sup>k</sup> Martijn Jongen,<sup>k</sup> Maarten de Jong,<sup>k</sup> Paul de Jong,<sup>k,t</sup> Matthias Kadler,<sup>ai</sup> Piotr Kalaczyński,<sup>ap</sup> Oleg Kalekin,<sup>f</sup> Uli F. Katz,<sup>f</sup> Nafis R. Khan Chowdhury,<sup>w</sup> Frits van der Knaap,<sup>u</sup> Els N. Koffeman,<sup>k,t</sup> Paul Kooijman,<sup>t,aq</sup> Antoine Kouchner,<sup>h,ar</sup> Michael Kreter,<sup>as</sup> Vladimir Kulikovskiy,<sup>e</sup> Robert Lahmann,<sup>f</sup> Giuseppina Larosa,<sup>o</sup> Remy Le Breton,<sup>h</sup> Francesco Leone,<sup>o,z</sup> Emanuele Leonora,<sup>a</sup> Giuseppe Levi,<sup>ac,ah</sup> Massimiliano Lincetto,<sup>n</sup> Miles Lindsey Clark,<sup>h</sup> Alessandro Lonardo,<sup>b</sup> Fabio Longhitano,<sup>a</sup> Daniel Lopez-Coto,<sup>at</sup> Giuliano Maggi,<sup>n</sup> Jerzy Mańczak,<sup>w</sup> Karl Mannheim,<sup>ai</sup> Annarita Margiotta,<sup>ac,ah</sup> Antonio Marinelli,<sup>ak,au</sup> Christos Markou,<sup>d</sup> Gregory Martignac,<sup>q</sup> Lilian Martin,<sup>q</sup> Juan A. Martinez-Mora,<sup>g</sup> Agnese Martini,<sup>ab</sup> Fabio Marzaioli,<sup>i,v</sup> Safaa Mazzou,<sup>y</sup> Rosa Mele,<sup>i,j</sup> Karel W. Melis,<sup>k</sup> Pasquale Migliozi,<sup>i</sup> Emilio Migneco,<sup>o</sup> Piotr Mijakowski,<sup>ap</sup> Luis S. Miranda,<sup>av</sup> Carlos M. Mollo,<sup>i</sup> Mauro Morganti,<sup>ak,aw</sup> Michael Moser,<sup>f</sup> Abdelilah Moussa,<sup>p</sup> Rasa Muller,<sup>k</sup> Paolo Musico,<sup>e</sup> Mario Musumeci,<sup>o</sup> Lodewijk Nauta,<sup>k</sup> Sergio Navas,<sup>at</sup> Carlo A. Nicolau,<sup>b</sup> Christine Nielsen,<sup>h</sup> Brian Ó Fearraigh,<sup>k,t</sup> Mukharbek Organokov,<sup>an</sup> Angelo Orlando,<sup>o</sup> Vasilis Panagopoulos,<sup>d</sup> Gogita Papalashvili,<sup>ax</sup> Riccardo Papaleo,<sup>o</sup> Cosimo Pastore,<sup>ad</sup> Gabriela E. P. v. laș,<sup>s</sup> Giuliano Pellegrini,<sup>ac</sup> Carmelo Pellegrino,<sup>ah,ay</sup> Mathieu Perrin-Terrin,<sup>n</sup> Paolo Piattelli,<sup>o</sup> Camiel Pieterse,<sup>w</sup> Konstantinos Pikounis,<sup>d</sup> Ofelia Pisanti,<sup>i,j</sup> Chiara Poirè,<sup>g</sup> Georgia Polydefki,<sup>d</sup> Vlad Popa,<sup>s</sup> Maarten Post,<sup>i</sup> Thierry Pradier,<sup>an</sup> Gerd Pühlhofer,<sup>az</sup> Sara Pulvirenti,<sup>o</sup> Liam Quinn,<sup>n</sup> Fabrizio Raffaelli,<sup>ak</sup> Nunzio Randazzo,<sup>a</sup> Antonio Rapicavoli,<sup>z</sup> Soebur Razzaque,<sup>av</sup> Diego Real,<sup>w,\*</sup> Stefan Reck,<sup>f</sup> Jonas Reubelt,<sup>f</sup> Giorgio Riccobene,<sup>o</sup> Marc Richer,<sup>an</sup> Louis Rigalleau,<sup>q</sup> Alberto Rovelli,<sup>o</sup> Ilenia Salvadori,<sup>n</sup> Dorothea F. E. Santeleben,<sup>k,ba</sup> Agustín Sánchez Losa,<sup>ad</sup> Matteo Sanguineti,<sup>e,ag</sup> Andrea Santangelo,<sup>az</sup> Domenico Santonocito,<sup>o</sup> Piera Sapienza,<sup>o</sup> Jan-Willem Schmelling,<sup>k</sup> Jutta Schnabel,<sup>f</sup> Virginia Sciacca,<sup>o</sup> Jordan Seneca,<sup>k</sup> Irene Sgura,<sup>ad</sup> Rezo Shanidze,<sup>ax</sup> Ankur Sharma,<sup>au</sup> Francesco Simeone,<sup>b</sup> Anna Sinopoulou,<sup>d</sup> Bernardino Spisso,<sup>r,i</sup> Maurizio Spurio,<sup>ac,ah</sup> Dimitris Stavropoulos,<sup>d</sup> Jos Steijger,<sup>k</sup> Simona M. Stellacci,<sup>l,r</sup> Bruno Strandberg,<sup>k</sup> Dominik Stransky,<sup>f</sup> Mauro Taiuti,<sup>e,ag</sup> Yahya Tayalati,<sup>l</sup> Enrique Tenllado,<sup>at</sup> Tarak Thakore,<sup>w</sup> Paul Timmer,<sup>k</sup> Steven Tingay,<sup>ao</sup> Ekaterini Tzamaridaki,<sup>d</sup> Dimitrios Tzanetatos,<sup>d</sup> Veronique Van Elewuyck,<sup>h,ar</sup> Federico Versari,<sup>ac,ah</sup> Salvo Viola,<sup>o</sup> Daniele Vivolo,<sup>i,j</sup> Gwenhael de Wasseige,<sup>n</sup> Joern Wilms,<sup>bb</sup> Rafał Wojaczyński,<sup>ap</sup> Els de Wolf,<sup>k,t</sup> Dmitry Zaborov,<sup>n,bc</sup> Angela Zegarelli,<sup>b,x</sup> Juan D. Zornoza,<sup>w</sup> and Juan Zúñiga<sup>w</sup>

<sup>a</sup>INFN, Sezione di Catania, Catania, Italy

<sup>b</sup>INFN, Sezione di Roma, Roma, Italy

<sup>c</sup>Universitat Politècnica de Catalunya, Centre Tecnològic de Vilanova i la Geltrú, Laboratori d'Aplicacions Bioacústiques, Vilanova i la Geltrú, Spain

<sup>d</sup>NCSR Demokritos, Institute of Nuclear and Particle Physics, Athens, Greece

<sup>e</sup>INFN, Sezione di Genova, Genova, Italy

<sup>f</sup>Friedrich-Alexander-Universität Erlangen-Nürnberg, Erlangen Centre for Astroparticle Physics, Erlangen, Germany

<sup>g</sup>Universitat Politècnica de València, Instituto de Investigación para la Gestión Integrada de las Zonas Costeras, Gandia, Spain

<sup>h</sup>APC, Université Paris Diderot, CNRS/IN2P3, CEA/IRFU, Observatoire de Paris, Sorbonne Paris Cité, Paris, France

<sup>i</sup>Complesso Universitario di Monte S. Angelo, INFN, Sezione di Napoli, Napoli, Italy

<sup>j</sup>Università di Napoli "Federico II," Complesso Universitario di Monte S. Angelo, Dipartimento Scienze Fisiche "E. Pancini," Napoli, Italy

<sup>k</sup>Nikhef, National Institute for Subatomic Physics, Amsterdam, The Netherlands

<sup>l</sup>University Mohammed V, Faculty of Sciences, Rabat, Morocco

<sup>m</sup>KVI-CART University of Groningen, Groningen, The Netherlands

<sup>n</sup>Aix Marseille University, CNRS/IN2P3, CPPM, Marseille, France

<sup>o</sup>INFN, Laboratori Nazionali del Sud, Catania, Italy

<sup>p</sup>University Mohammed I, Faculty of Sciences, Oujda, Morocco

<sup>q</sup>Université de Nantes, Subatech, IMT Atlantique, IN2P3-CNRS, Nantes, France

<sup>r</sup>Università di Salerno e INFN Gruppo Collegato di Salerno, Dipartimento di Fisica, Fisciano, Italy

<sup>s</sup>ISS, Măgurele, Romania

<sup>t</sup>University of Amsterdam, Institute of Physics/IHEF, Amsterdam, The Netherlands

<sup>u</sup>TNO, Technical Sciences, Delft, The Netherlands

- <sup>v</sup>Università degli Studi della Campania "Luigi Vanvitelli," Dipartimento di Matematica e Fisica, Caserta, Italy  
<sup>w</sup>IFIC - Instituto de Física Corpuscular (CSIC - Universitat de València), Valencia, Spain  
<sup>x</sup>Università La Sapienza, Dipartimento di Fisica, Roma, Italy  
<sup>y</sup>Gran Sasso Science Institute, GSSI, L'Aquila, Italy  
<sup>z</sup>Cadi Ayyad University, Department of Physics, Faculty of Science Semlalia, Marrakech, Morocco  
<sup>aa</sup>Università di Catania, Dipartimento di Fisica e Astronomia, Catania, Italy  
<sup>ab</sup>INFN, LNF, Frascati, Italy  
<sup>ac</sup>INFN, Sezione di Bologna, Bologna, Italy  
<sup>ad</sup>INFN, Sezione di Bari, Bari, Italy  
<sup>ae</sup>University of Bari, Bari, Italy  
<sup>af</sup>University of Granada, Department of Computer Architecture and Technology/CITIC, Granada, Spain  
<sup>ag</sup>Università di Genova, Genova, Italy  
<sup>ah</sup>Università di Bologna, Dipartimento di Fisica e Astronomia, Bologna, Italy  
<sup>ai</sup>University Würzburg, Würzburg, Germany  
<sup>aj</sup>Western Sydney University, School of Computing, Engineering and Mathematics, Penrith, New South Wales, Australia  
<sup>ak</sup>INFN, Sezione di Pisa, Pisa, Italy  
<sup>al</sup>University of Münster, Institut für Kernphysik, Münster, Germany  
<sup>am</sup>Utrecht University, NIOZ (Royal Netherlands Institute for Sea Research), Texel, The Netherlands  
<sup>an</sup>Université de Strasbourg, CNRS, IPHC, Strasbourg, France  
<sup>ao</sup>Curtin University, Curtin Institute of Radio Astronomy, Perth, Western Australia, Australia  
<sup>ap</sup>National Centre for Nuclear Research, Warsaw, Poland  
<sup>aq</sup>Utrecht University, Department of Physics and Astronomy, Utrecht, The Netherlands  
<sup>ar</sup>Institut Universitaire de France, Paris, France  
<sup>as</sup>North-West University, Centre for Space Research, Potchefstroom, South Africa  
<sup>at</sup>University of Granada, Departamento de Física Teórica y del Cosmos & C.A.F.P.E., Granada, Spain  
<sup>au</sup>Università di Pisa, Dipartimento di Fisica, Pisa, Italy  
<sup>av</sup>University of Johannesburg, Department Physics, Auckland Park, South Africa  
<sup>aw</sup>Accademia Navale di Livorno, Livorno, Italy  
<sup>ax</sup>Tbilisi State University, Department of Physics, Tbilisi, Georgia  
<sup>ay</sup>INFN, CNAF, Bologna, Italy  
<sup>az</sup>Eberhard Karls Universität Tübingen, Institut für Astronomie und Astrophysik, Tübingen, Germany  
<sup>ba</sup>Leiden University, Leiden Institute of Physics, Leiden, The Netherlands  
<sup>bb</sup>Friedrich-Alexander-Universität Erlangen-Nürnberg, Remeis Sternwarte, Bamberg, Germany  
<sup>bc</sup>NRC "Kurchatov Institute," A.I. Alikhanov Institute for Theoretical and Experimental Physics, Moscow, Russia

**Abstract.** The KM3NeT research infrastructure being built at the bottom of the Mediterranean Sea will host water-Cherenkov telescopes for the detection of cosmic neutrinos. The neutrino telescopes will consist of large volume three-dimensional grids of optical modules to detect the Cherenkov light from charged particles produced by neutrino-induced interactions. Each optical module houses 31 3-in. photomultiplier tubes, instrumentation for calibration of the photomultiplier signal and positioning of the optical module, and all associated electronics boards. By design, the total electrical power consumption of an optical module has been capped at seven Watts. We present an overview of the front-end and readout electronics system inside the optical module, which has been designed for a 1-ns synchronization between the clocks of all optical modules in the grid during a life time of at least 20 years. © 2019 Society of Photo-Optical Instrumentation Engineers (SPIE) [DOI: 10.1117/1.JATIS.5.4.046001]

Keywords: front-end electronics; readout electronics; neutrino telescope; KM3NeT.

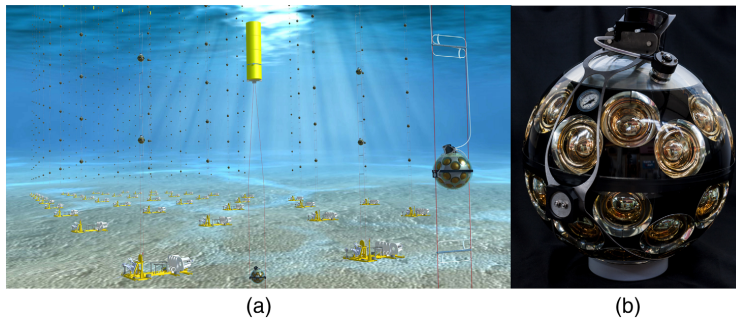
Paper 19079 received Jul. 18, 2019; accepted for publication Nov. 27, 2019; published online Dec. 23, 2019.

## 1 Introduction

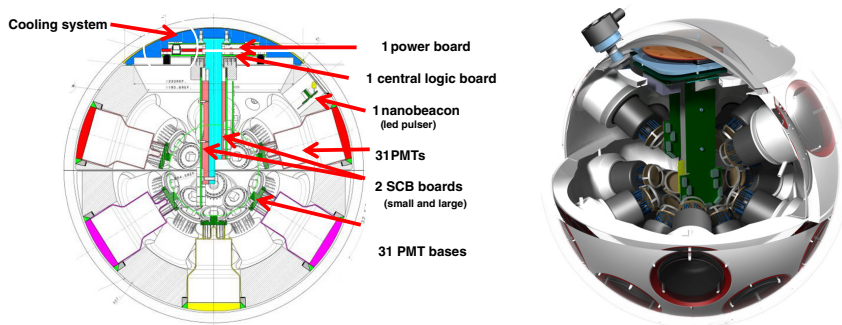
KM3NeT is a European research facility being built at the bottom of the Mediterranean Sea. It will host the future large volume ORCA<sup>1</sup> and ARCA<sup>2</sup> neutrino telescopes. The ARCA telescope (Astroparticle Research with Cosmics in the Abyss), a cubic kilometer-scale detector mainly dedicated to the detection of high energy neutrinos of astrophysical origin, is being installed at a site located offshore from the coast of Sicily, Italy, at an approximate depth of 3500 m. The detector of the Oscillation Research with Cosmics in the Abyss telescope (ORCA), located at a depth of about 2400-m offshore of Toulon, France, will be optimized for the detection of lower energy neutrinos to allow for the study of fundamental properties of neutrinos. ARCA and

ORCA share the same detector technologies.<sup>3</sup> Cherenkov light produced by neutrino-induced charged particles will be detected by a regular array of optical modules in the water volume of the telescope [Fig. 1(a)]. Each module [Fig. 1(b)] is a high-pressure resistant, 17-in.-diameter glass sphere containing 31 3-in. photomultiplier tubes (PMTs), instrumentation for calibration and positioning, and all associated electronics boards. The modules are called digital optical modules (DOMs).<sup>4–6</sup> Eighteen DOMs, uniformly distributed along a vertical slender structure, form a detection unit (DU). The DOMs are held in place by means of two thin ropes. The DU is anchored on the seabed and kept in a close to vertical position by a submerged buoy at its top. An electro-optical backbone cable, with breakouts at each DOM, runs along the full DU length, providing connection for power feeding with one DU common line of 400 V, and data transmission with one single fiber per DOM.

\*Address all correspondence to Diego Real, E-mail: [real@ific.uv.es](mailto:real@ific.uv.es); David Calvo, E-mail: [dacalcia@ific.uv.es](mailto:dacalcia@ific.uv.es); Vincent van Beveren, E-mail: [v.van.beveren@nikhef.nl](mailto:v.van.beveren@nikhef.nl)



**Fig. 1** (a) Artistic illustration of the KM3NeT detector. Note that the illustration is not to scale and that sunlight will not actually reach the depths at which the KM3NeT detector is deployed. (b) A picture of the KM3NeT optical module with the fly's eye organization of the PMTs and the cap of the aluminum cooling "mushroom" visible. The titanium collar around the module supports the connection to the ropes of the DU.



**Fig. 2** Two- and three-dimensional drawings of the DOM showing the positions of the different devices.

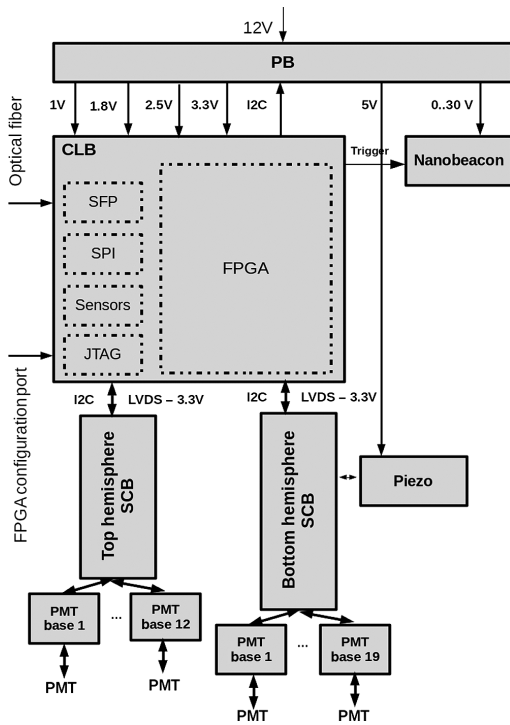
In each DOM, the 31 PMTs are organized in five rings of six PMTs, plus a single one at the bottom pointing downward (Fig. 2). The PMTs are kept in place by a three-dimensional printed support structure. The lower and the upper hemispheres of the module contain 19 and 12 PMTs, respectively. In the upper hemisphere, a mushroom-shape aluminum structure provides support to the electronic boards of the DOM. The top surface of the mushroom cap is glued to the glass sphere in order to provide heat dissipation to the seawater. The measured temperature (oC) inside the DOM is about 22 deg with a sea temperature around 13 deg. Fixed to the mushroom cap is the power board, which provides all the dc voltages needed by the electronics. This board will be described in Sec. 3. The central logic board (CLB), which contains a field programmable gate array (FPGA), is directly connected to the power board. In the FPGA, the intellectual property (IP) cores that capture the PMT-generated signals are embedded. Also embedded in the FPGA is an implementation of the White Rabbit (WR),<sup>7</sup> a fully deterministic Ethernet-based timing protocol that provides both data transmission and accurate timing. The WR technology allows for a synchronization of the clocks of all CLBs in the telescope at nanosecond precision.

The description of the CLB is presented in Sec. 2. In Sec. 4, the PMT base board, which generates and adjusts the high voltage (HV) supply of the PMT and converts the analog signals

generated by the PMTs to low voltage differential signaling (LVDS) is described. Two signal collection boards (SCBs), one for each DOM hemisphere, connect the CLB with the PMTs allowing for command and data signal transfer. The SCB is described in Sec. 5.

The light detected by a PMT is converted into an electrical pulse. When this electrical pulse surpasses a predetermined threshold, the PMT base board sets its LVDS output. This output is reset when the electrical pulse goes below the threshold. The first crossing of the threshold and the time over threshold (ToT) will be measured by the time-to-digital converters (TDCs) implemented in the CLB. The ToT gives an estimate of the pulse amplitude and its charge. The calibration of the PMT HV, using the DOM acquisition electronics system, provides an average ToT value of 26.4 ns when a single photoelectron (spe) impinges on a PMT with a threshold set at 30% of the spe.<sup>8</sup>

The CLB organizes the acquisition of the LVDS signals in frames, or timeslices, of fixed length in time, typically 100 ms. The data acquired and organized in timeslices are sent to a computer farm onshore via an optical network integrated in the submarine cables and junction boxes. The DU anchor hosts a base module equipped with a wet-mateable jumper to connect the DU to the seafloor network. The full chain of readout electronics was successfully qualified in a prototype DU of three DOMs deployed at the Italian KM3NeT site in May 2014 and operated



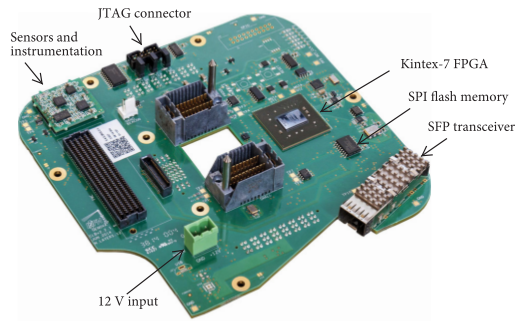
**Fig. 3** Block diagram of the DOM electronics boards and their interconnections. The power board receives the 12-V input and generates all the voltages needed by the rest of electronics board. The CLB, the main electronics board, includes an FPGA where the data acquisition firmware runs, as well as different sensors and for communication via an optical fiber. The SCBs transfer the PMT signals to the CLB, while the PMT base digitizes the PMT signals. The CLB FPGA configuration port is not used in a closed DOM.

for more than 1 year.<sup>9</sup> Mass-produced electronics are operational in full-size deployed DUs with 18 DOMs,<sup>10</sup> thus demonstrating their functionality.

Figure 3 shows a block diagram of the different DOM electronics boards and their interconnections. The power consumption of the DOM is discussed in Sec. 6 and the reliability studies performed on the DOM electronics boards are presented in Sec. 7. Finally, a conclusion is given about the front-end and readout electronics system in light of the design goals set out by the KM3NeT Collaboration.

## 2 Central Logic Board

The DOM CLB<sup>11,12</sup> (Fig. 4) is the main electronics board in the readout chain of KM3NeT. The PMT bases generate LVDS signals from the PMT electrical pulses. The corresponding SCB receives and distributes these signals to the CLB, where they are digitized with a resolution of 1 ns by TDCs running in the FPGA programmable logic. After being organized and time stamped in the CLB, the TDC data are transferred to the onshore station for further processing and storage. The CLB board also houses a compass/tiltmeter, three temperature sensors, and a humidity sensor. In addition, it provides a connection for an



**Fig. 4** The DOM CLB. The dimensions of the board are 150 mm x 150 mm.

LED flasher, called a nanobeacon.<sup>13</sup> In addition, a piezo sensor is connected to the CLB via the SCB that serves the lower hemisphere.

The control of the CLB is achieved by means of custom software, which runs in a LatticeMico32 (LM32)<sup>14</sup> soft-processor operating in the programmable logic of the CLB FPGA.

In the next sections, the hardware, firmware, and software of the CLB are described.

### 2.1 Central Logic Board Hardware

The CLB printed circuit board (PCB) comprises 12 layers: six of them are dedicated to signals, two of them to power planes, while the remaining four layers are ground. The ground layers surround the power planes in order to reduce the electromagnetic interference from the power layers on the signal layers and to improve the signal integrity.<sup>15</sup> For the same reasons, the number of vias in these layers has also been minimized wherever possible. Special care has been taken in routing the LVDS signals generated by the PMT base boards. The difference in length between any of the differential pairs has been kept below 100 ps. Moreover, in the case of the clock signals, this difference has been reduced to below 20 ps.

The central coordinating component of the CLB is a Xilinx Kintex-7 FPGA (XC160-T), chosen for its relatively low power consumption. Other relevant components are the serial peripheral interface (SPI) flash memory, which stores four images of the FPGA and the configuration parameters of the CLB; the programmable oscillators, which provide the appropriate clock signals needed by the WR protocol; two press fit connectors that provide a solid mechanical and electrical connection between the CLB and the SCB. The CLB board includes a 25-MHz crystal oscillator. The oscillator signal is first transferred from a clock pin to a buffer in the FPGA, and then fanned out to the inner phase locked loop (PLL) to provide two high frequency clocks of 250 MHz but with a 90-deg phase shift needed by the TDC core. The main component used for the communications with the onshore station is the small form-factor pluggable (SFP) transceiver, which interfaces the electronics with the optics system.

### 2.2 CLB Firmware

The readout logic of the DOM runs in the programmable fabric of the FPGA. A block diagram of the readout logic is shown in Fig. 5. Its main blocks are:

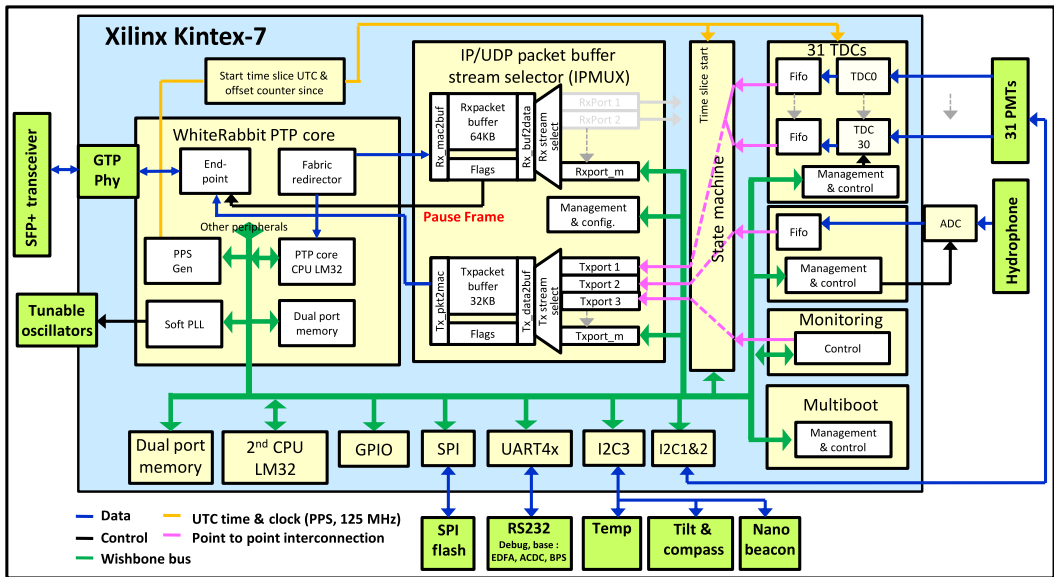


Fig. 5 Block diagram of the CLB FPGA firmware.

- The LM32 soft-processor running the control and monitoring software for the CLB.
- The White Rabbit PTP Core (WRPC) [precision time protocol (PTP)], which implements the WR protocol.
- The TDCs, which digitize and time-stamp the PMT signals arriving at the CLB.
- The state machine and IPMUX cores, which collect the TDC data from the PMTs, Audio Engineering Society version 3 (AES3) data from the piezo sensor, and the monitoring data from the LM32, and dispatch them over Ethernet to the onshore station.<sup>16</sup>
- The multiboot core, which allows safe remote reconfiguration of the FPGA firmware.
- The different control cores for the instrumentation.

### 2.2.1 Soft-microcontroller

Central to the control and monitoring of the CLB is the LM32, a section of the FPGA fabric consisting of a central processing unit (CPU), random access memory (RAM), and peripherals for timing and communication [universal asynchronous receiver/transmitter, SPI, and inter integrated circuit (I<sup>2</sup>C)]. The LM32 was chosen because it uses less FPGA resources than other CPUs<sup>17</sup> and has a wishbone bus<sup>18</sup> master interface. For the wishbone bus, many open-source programmable logic peripherals exist, such as SPI/I<sup>2</sup>C controllers, coprocessors, timers, and counters. In addition, the LM32 CPU is also used in the WRPC, easing the integration and reducing the design complexity. The CPU runs at 62.5 MHz and has 128 KB of combined program and data RAM. Moreover, the wishbone bus also connects to the KM3NeT-specific programmable logic cores, such that the LM32 can control and monitor the peripherals, which are discussed in the next sections.

### 2.2.2 White Rabbit PTP core

The WRPC is an enhanced Ethernet media access controller (MAC), embedded in the CLB FPGA programmable logic. Apart from transferring data as a regular Ethernet MAC does, the WR protocol synchronizes all CLB clocks in the detector. The protocol is based on the synchronous Ethernet (SyncE) and PTP standards.<sup>19</sup> The WRPC synchronizes the CLB through the same optical link that is used for data transmission. The global time of the network is provided by the WR master switch located onshore, which is synchronized to a global positioning system receiver. The WRPC IP core synchronizes with the WR master switch and provides a register with the coordinated universal time (UTC), which is used by the rest of the CLB firmware. It also outputs a pulse per second (PPS) signal, whose rising edge occurs precisely at the second transition of the global CLB UTC. In order to qualify the stability of the synchronization at the CLB, the skew between the PPS of the CLB and the PPS of a WR switch has been measured at the laboratory using a 50-km optical fiber connection. The skew has a Gaussian distribution with a 22-ps standard deviation (Fig. 6). On the other hand, the time synchronization between DOMs in a deployed

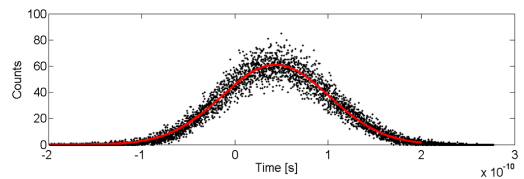


Fig. 6 Skew, measured at the laboratory, of the PPS of the CLB with respect to the PPS of the master WR switch. The red line is a Gaussian fit to the data with 22-ps standard deviation.



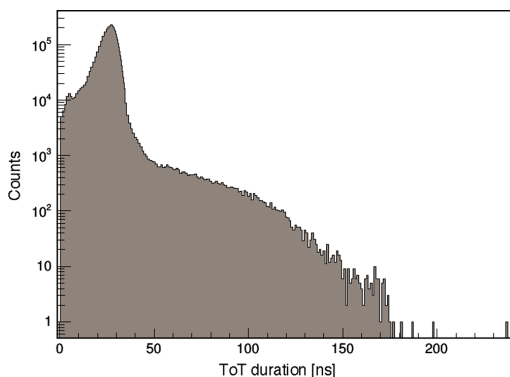
DU of ARCA, which takes into account the transit-time spread of the PMT and other types of jitters, has been measured *in situ* using down-going muons and a nanobeacon showing to be of the order of one ns.<sup>20</sup>

### 2.2.3 State machine

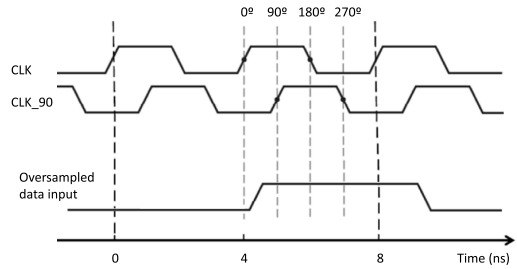
The data acquisition is organized in consecutive frames with a period of typically 100 ms, called timeslices. The state machine core orchestrates the data acquisition for the CLB. First, it is responsible for generating the periodic start of the timeslice signal. This signal is synchronized to the start of a UTC second and repeats at the start of every period. All data acquiring IP cores synchronize their acquisition to this start timeslice signal, and all acquired data are sectioned and time stamped relative to it. Second, the state machine is responsible for gathering the acquired data and merging the UTC time of the timeslice start signal, called the super time, to the acquired data. By combining the relative timeslice time and the super time, the UTC time for all acquired data can be resolved by the onshore data acquisition system. Once the acquired data are ready, the last responsibility of the state machine is to package the data to be dispatched toward the user datagram protocol (UDP) packet generator (IPMux). The data are portioned into frames such that they will fit within the payload of a UDP jumbo packet. A frame header containing metadata, such as the stream identifier or the run number, is also prepared.

### 2.2.4 Time-to-digital converter

The TDCs sample the signals from the PMT bases. They are implemented in the CLB FPGA programmable logic with one TDC channel per PMT, totaling 31 IP cores. The cores measure both the pulse arrival time and the duration of the pulse (ToT) using the 1-ns precision UTC WRPC time. The distribution of the ToT data readout as measured by one DOM is shown in Fig. 7. The TDC core produces 48 bits per event, where the first eight most significant bits are used for the PMT identifier and to store the status of the high rate veto (HRV) and first-in first-out (FIFO) full condition, the next 32 bits code the arrival time of



**Fig. 7** ToT distribution from one DOM of a deployed KM3NeT DU. All the channels have been calibrated in order to harmonize the ToT data arriving from different PMTs. The represented data correspond to both background and muons. The calibration process consists of tuning the HV until an spe provides a ToT between 26 and 27 ns. This ToT corresponds, on average, to a gain of  $3 \times 10^6$ .



**Fig. 8** Oversampling technique using two phase-shifted clocks. Technique implemented in the CLB TDCs.

the event with respect to the timeslice start time, and the last eight bits code the duration. The events are then dispatched to the state machine, which also organizes the TDC acquisition in timeslices.

The system clock of the FPGA firmware is derived from the 25-MHz hardware quartz oscillator in the PCB. This clock signal is first transferred to a digital PLL to generate the system frequency of 62.5 MHz. The WR protocol adjusts the phase and frequency of the FPGA system clock to the reference master clock. Finally, the adjusted system clock is fanned out to the inner PLLs within the FPGA to provide two high frequency clocks of 250 MHz with a phase shift of 90 deg. The TDC input signals are oversampled at a 1-ns rate using the rising and falling edges of the two clocks of 250 MHz as shown in Fig. 8.

The information of the sampling is organized by the TDCs, where the arrival time and the pulse length are coded. As with all other CLB IP cores connected to the LM32 soft CPU, the TDC core is controlled by the LM32 itself, allowing for enabling/disabling any of the 31 TDC channels.

The TDCs implement the HRV and multihit features. The HRV limits the total number of acquired hits in a timeslice. If the number of events in a TDC channel surpasses a predetermined threshold, the acquisition is stopped in that channel until the start of the next timeslice. In this way, it is possible to limit the amount of data sent onshore, preventing blockage of the data acquisition. The multihit option allows to expand the range of the TDCs, limited by the ToT codification of eight bits. If this option is active, then the hits with a ToT longer than 255 ns are coded as two or more consecutive events.

### 2.2.5 Acoustic readout

The CLB also includes a core for the readout of the acoustic piezo sensor,<sup>21</sup> one of the positioning instrumentation devices installed in the DOM. This core reads out the acoustic piezo channel data and time stamps it with respect to the WRPC time. In addition, it generates from the raw acoustic data an AES3 formatted stream, which is dispatched to the state machine.

### 2.2.6 IPMux

The packets created by the state machine are sent to one of the input ports of the IPMux, an IP/UDP packet buffer stream selector. The IPMux has different input ports for each data source. For each packet received from the state machine, a UDP header is added. By using the Ethernet jumbo frames, a maximum transfer unit of 9014 bytes per frame is possible, consequently

reducing protocol overhead significantly when the channel is fully occupied.

The IPMux receives also data from TDCs, the acoustic readout, the monitoring, and the slow control LM32 channels. All of them are aggregated on the IPMux and transferred to the WRPC endpoint, where they are routed through the WR core and sent onshore. Once they arrive on shore, it is possible to discriminate any of the sources of the IPMux (optical, acoustic, and monitoring channel) by the port number.

### 2.2.7 Monitoring channel

The monitoring channel enables transmission of metadata synchronous with the TDC and AES3 channels. However, unlike the TDC and AES3, the monitoring channel is not data driven and produces only one packet of content at the timeslice start signal. The header of the packet provides information regarding the TDC FIFO buffer. The monitoring packet consists of two parts. The first part is delivered by programmable logic, containing additional summary information concerning the TDC channel, such as the actual number of hits per channel. The content of the second part is software defined. At initialization, the programmable logic is provided with a pointer to a software-defined structure. For each timeslice, the content of this structure is combined before dispatching to the state machine.

The software provides additional information such as the latest reading from the compass and tilt sensor. Information about the state of the buffers and other system information is also inserted into this packet.

### 2.2.8 Multiboot core

On startup, the FPGA configures itself by loading the first valid image it finds while scanning the SPI flash memory. Up to four images can be stored in the flash memory at subsequent memory locations, reserving the memory regions above those images for storage of settings and logging. The multiboot gives access to the internal Xilinx specific ICAP2 hard-IP block, which allows software-initiated reconfiguration of the FPGA at any memory offset. The multiboot is an essential part of the two-stage startup sequence used for fail-safe startup of the CLB. The multiboot mechanism is described in Sec. 2.3.3.

## 2.3 CLB-Embedded Software

The FPGA contains two LM32 processors, the WRPC LM32 and the second LM32. Both run a separate software stack. The WRPC LM32 software was developed by the WR Collaboration,<sup>22</sup> but it has been adapted to the KM3NeT network topology. The second LM32 controls the DOM. The software has been developed by the KM3NeT collaboration and designed as control software for the KM3NeT detector. The latter software is discussed in the following sections.

### 2.3.1 Main tasks

The KM3NeT-embedded software handles the following tasks:

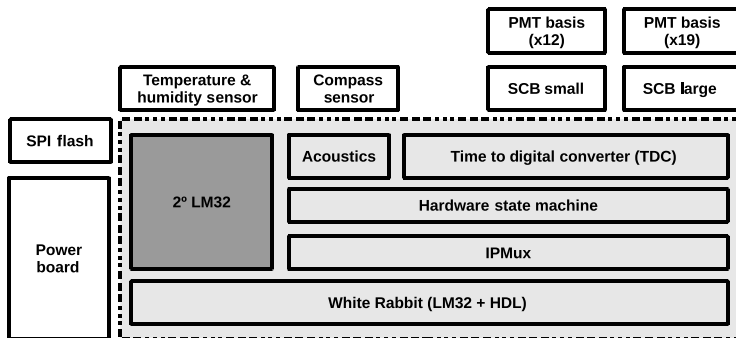
- Initializing, controlling, and monitoring hardware.
- Executing commands issued from the onshore station.
- Sending diagnostic information back to shore.
- Applying firmware updates.

A representation of the hardware directly coupled to the second LM32 is shown in Fig. 9. Most of the components inside the dashed line are programmable logic cores, including the CPUs. The hardware devices lie outside the dashed line boundary. Almost all cores are mapped into the memory space of the LM32. The embedded software reads from or writes to specific memory locations, depending on the device addressed. Outside the dashed lines in Fig. 9, the hardware is controlled through external integrated circuit (IC) buses such as I<sup>2</sup>C or SPI. The interfaces require an additional layer of drivers to communicate with these devices.

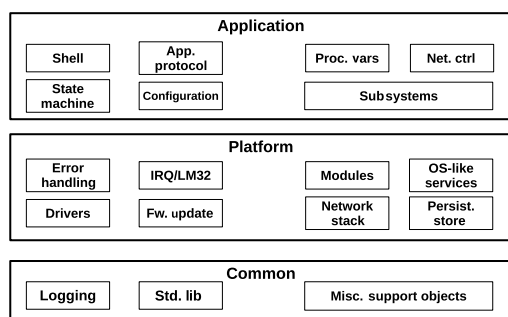
### 2.3.2 Software generalities

The software running in the CPU is primarily coded in C, but some bootstrap and interrupt handling code has been written in LM32 assembly. There is no preemptive embedded operating system, but just a simple kernel capable of executing different tasks in a collaborative fashion. The layered structure of the main modules of the software stack is shown in Fig. 10.

The common layer contains functions and objects used throughout the software. They are not specific to the LM32 platform and could be compiled for any architecture. For example, the logging facilities are placed in this layer. The platform layer



**Fig. 9** Embedded software location with respect to the main components of the CLB, shown in gray. The dashed line shows the boundaries of the FPGA.

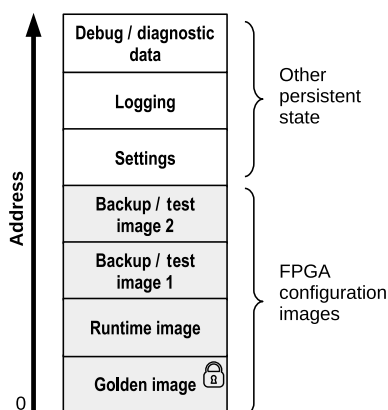


**Fig. 10** Layers and modules of the CLB embedded software.

contains all the code required to control the LM32 and all the connected hardware. It consists of hardware control, operating system like services, and the network stack. It does not contain application functionality, but it provides convenient functions for the application layer to control and monitor the hardware. Finally, the application layer contains the high-level functionality of the software. It interprets and executes remote commands, configures and monitors the hardware, and implements the software state machine.

### 2.3.3 Firmware update and multiboot

As explained in Sec. 2.2.8, the embedded software has, through the multiboot core, the capability of configuring the FPGA from any image located in the serial flash. For the CLB, the flash may contain up to four separate configuration images, starting at address 0 with the startup image, also known as the golden image. The subsequent image is the runtime image, then two possible backup images or test images follow. After this, the space is reserved for settings and persistent logging. The remaining area of the flash is reserved for storing custom debug and diagnostic information. The complete flash layout is shown in Fig. 11.



**Fig. 11** Content of the serial flash memory. The golden startup image starts at address 0, followed by the primary runtime image, and two backup images. The remainder of the memory contains various types of persistent states.

The golden image is a special image with minimal hardware initialization. The memory region occupied by the golden image is protected from accidental overwrite by the write protection feature part of the flash controller. The golden image will start by default a preselected image, usually the runtime image, 30 s after a network connection has been established. In exceptional conditions, the startup procedure can be aborted from shore in the 30-s window. The golden image also provides access to diagnostic and recovery features. Each image on the flash can be updated by remote, including the golden image. However, the latter is an exceptional case and should be avoided. To deal with such cases, a precise and safe procedure has been prepared, which safeguards against accidental loss of CLB due to lack of valid images in the flash. The procedure requires that at least one valid image is always present in the serial flash, even during update.

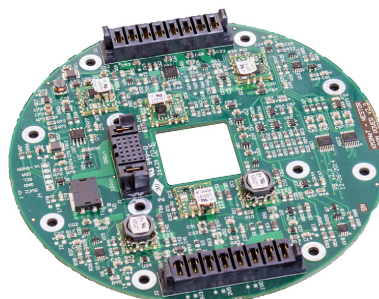
## 3 Power Board

The power board,<sup>23</sup> shown in Fig. 12, provides power to the CLB and the full DOM. The schematic view of the power board functionality is shown in Fig. 13. The input supply to the power board is 12 V. Six regulated voltages (1, 1.8, 2.5, 3.3, 3.3 V PMT, and 5 V) are generated from the 12-V using dc/dc converters. The 1, 1.8, 2.5, and 3.3 V outputs are used by the CLB to supply the FPGA. The 3.3-V PMT output supplies the 31 PMT base boards and the 5-V voltage is used to supply the acoustic piezo sensor. Moreover, the power board provides another output, settable via an I<sup>2</sup>C digital-to-analog converter (DAC), which results in a configurable voltage ranging from 0 to 30 V. The settable channel is used by the nanobeacon. The power board uses high-efficiency dc/dc converters in order to minimize the power consumption in the DOM. The efficiencies of these dc/dc converters are listed in Table 1.

In order to protect the sensitive electronics inside the DOM from the interferences by the high frequency noise produced by the dc/dc converters, the power board is located in the shielded part of the cooling mushroom. The chosen location also provides a better cooling of the power board. The location of the power board in the DOM is shown in Fig. 2.

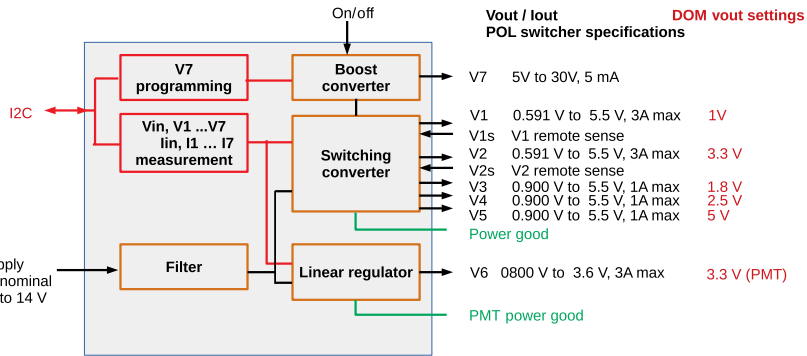
### 3.1 Power Startup

One of the functions of the power board is to provide a proper voltage startup sequence to the FPGA. For this purpose, a sequencer has been implemented in the power board in order to provide the needed sequence of voltages.<sup>24</sup> The sequence of voltages generated by the power board is shown in Fig. 14. Two



**Fig. 12** The DOM power board, having a diameter of 130 mm.

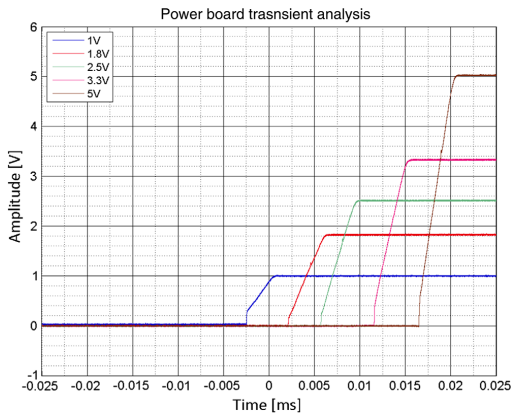




**Fig. 13** Block diagram of the power board functionality. The specification of the dc/dc converters is presented for each power rail. The linear regulator included in the power board is used to provide a stable voltage to the PMTs.

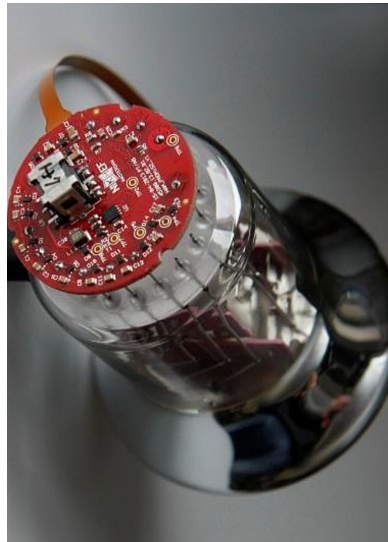
**Table 1** Power board efficiency for each output voltage.

$V$ (V)	$I$ (A)	Type of dc/dc	Efficiency (%)
2.5	0.13	OKL-1	60
3.3	0.33	OKL-3	65
3.3	0.34	OKL-1	90
1.0	0.80	OKL-3	80
1.8	0.46	OKL-1	80
5.0	0.10	OKL-1	60



**Fig. 14** Power up sequence. The picture corresponds to an oscilloscope capture. The oscilloscope trigger, set to 0.9 V, fixes the time reference.

power-good signals are generated by the power board. The first one indicates that the 3.3-V PMT output has been successfully started (power-good PMT). The second one indicates the successful completion of the power up sequence. The final function

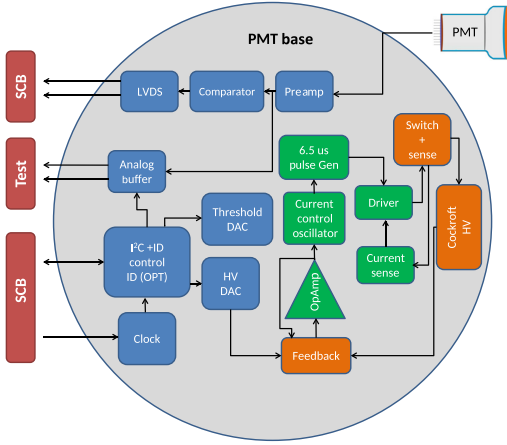


**Fig. 15** The PMT base board mounted on a 3-in. PMT.

implemented in the power board is a hysteresis loop to avoid instabilities at the startup. The regulators of the power board are enabled only when the input voltage exceeds 11 V, whereas they are disabled when the input value drops below 9.5 V. In this way, fluctuations in the power board regulators are avoided at the start point of the input voltage.

#### 4 Photomultiplier Base

The PMT base board<sup>25</sup> (see Fig. 15) takes care of both the generation of the HV supplied to the PMT and the digitization of the PMT signal. Before being digitized, the PMT signal is amplified by a preamplifier built in the PMT base. One of the main components of the PMT base is a comparator, which provides a logical high signal when the PMT output is over the comparator threshold—set through I<sup>2</sup>C. The duration of the primary signal



**Fig. 16** Block diagram of the PMT base. CoCo subsystems are represented in green, front-end mixed signal ASIC (PROMiS) subsystems are represented in blue, while discrete components are represented in orange.

(ToT) provided by the PMT bases is accurately measured by the CLB TDCs. In addition to the logical signal, the PMT base also outputs the amplified analog PMT signal, which is only used for testing. The 31 PMT base boards are connected to the SCB by a flexible PCB. The HV, which is remotely configurable through I<sup>2</sup>C, is independently generated in each PMT base. This allows for tuning the gain of individual PMTs in order to equalize cross-PMT photon response to provide a ToT range of 26 to 27 ns for single detected photons. The HV value can be adjusted remotely, from  $-800$  to  $-1400$  V. The PMTs are directly coupled to an external circuit, therefore, a negative HV is used.<sup>26</sup> The HV is generated by a Cockcroft Walton (CW) voltage multiplier circuit driven by a flyback converter. The output of the voltage multiplier circuit is used to drive the dynodes of the PMT. A diagram of the PMT base board with its main components is shown in Fig. 16.

#### 4.1 Photomultiplier Base ASICs

In order to reduce the space occupied by the PMT base, as well as its cost and power consumption, two application-specific integrated circuits (ASICs) have been developed.<sup>27</sup> As the DOM is tightly packed with the 31 PMTs and the electronics, compactification is crucial. The first ASIC is the so-called PROMiS ASIC, which performs the readout of the PMT signals and has two different parts, one digital and one analog. The second chip is the CoCo ASIC, which controls the Cockcroft–Walton HV power supply providing a target gain in the  $10^6$  range. The main characteristics of both ASICs are listed in Tables 2 and 3.

##### 4.1.1 PROMiS analog block

The analog section of the PROMiS ASIC includes a preamplifier, which can increase the amplitude signal of the PMT; a two-stage charge amplifier biased at 1 V (feedback:  $R_f = 15$  k $\Omega$ ,  $C_f = 300$  fF); and a discriminator that compares the input signal with a predefined threshold level configured by I<sup>2</sup>C. The PROMiS ASIC generates the LVDS signal. The signal is

**Table 2** Specifications of the PROMiS chip.

Time resolution (for a single photon, photomultiplier + electronics)	<2 ns
Two-hit time separation	$\geq 25$ ns
Power consumption	35 mW
Supply voltage, technology	3.3 V, 0.35 $\mu$ m CMOS AustriaMicro Systems (AMS)
Comparator threshold adjustment	8 bits (0.8 to 2.4 V)
HV feedback control	8 bits (0.8 to 2.4 V)
Slow-control communication, digital and analog output	I <sup>2</sup> C, LVDS, and analog buffer, respectively

**Table 3** Specifications of the CoCo chip.

Pulse output frequency	<50 kHz (max.)
Pulse width	<6.5 $\mu$ s (max.)
Power consumption	<1 mW
Supply voltage, technology	3.3 V, 0.35 $\mu$ m CMOS AMS
Current sense	100 mV over 1.5 $\Omega$
Operational amplifier reference (internal)	1.2 V

transmitted via the SCB to the CLB where it is digitized by the corresponding TDC. The LVDS driver, with common mode feedback, feeds the 100  $\Omega$  kapton-insulated transmission line. The 1.2-V reference voltage is produced by a band-gap voltage reference. From this reference voltage, all the remaining voltages and currents used in the ASIC are generated. Figure 17 shows the block diagram of the ASIC.

##### 4.1.2 PROMiS digital block

The PROMiS ASIC includes, in its digital block, an I<sup>2</sup>C slave and one-time programmable memory block where a unique identifier of the chip is stored. In Fig. 17, the block diagram of the PROMiS ASIC, including its digital part, is shown. In order to save power, it is possible to shut off the clock via an enable/disable signal. The ASIC provides both the possibility to test the analog chain via I<sup>2</sup>C and to switch on and off the HV circuit. In addition, it includes a clock generator that produces a 10-MHz clock signal with possible fluctuations due to temperature and voltage up to 30%. The clock accuracy is not critical as it is used by the I<sup>2</sup>C interface, whose bus operates at 250 kHz.

##### 4.1.3 CoCo: Cockcroft Walton multiplier feedback control ASIC

The CoCo ASIC (see block diagram in Fig. 18) controls the autotransformer of the PMT base. The autotransformer, which has a ratio of 1:12, couples the 3.3-V power supply provided by the SCB to the CW multiplier circuit. The CW multiplier circuit generates the stable HV needed by the PMT. The logarithm of

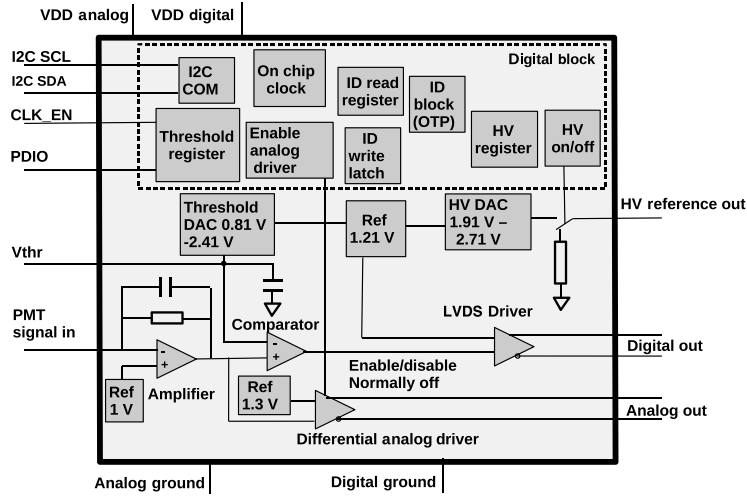


Fig. 17 Diagram of the PROMIS chip.

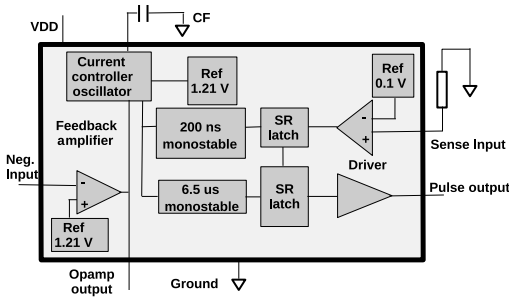


Fig. 18 Block diagram of the CoCo chip.

the PMT gain has a linear response to the HV. The ASIC receives feedback from the CW multiplier circuit in order to accurately control the HV. The control is performed by a series of pulses to the switch that is managing the autotransformer. The characteristic pulse width is  $6.5 \mu\text{s}$  and its frequency, which determines the HV, changes according to the HV feedback. The HV feedback voltage is used for charging (or discharging) a capacitor. The value of the capacitor, loaded by the current of the HV feedback, sets the frequency. The triangular wave created by the charge and discharge of the capacitor is also used for generating internal clocks. Another function of the HV feedback is to avoid the autotransformer saturation in case of short circuit.

The relation between the PMT DAC value and the actual produced HV is shown in Fig. 19. The relation between the DAC value and the output voltage can be derived from the PMT base HV circuit and is given as

$$V_{\text{HV}} = -F \left( V_{\text{min}} - V_{\text{ref}} + D \frac{V_{\text{max}} - V_{\text{min}}}{255} \right) + V_{\text{ref}}, \quad (1)$$

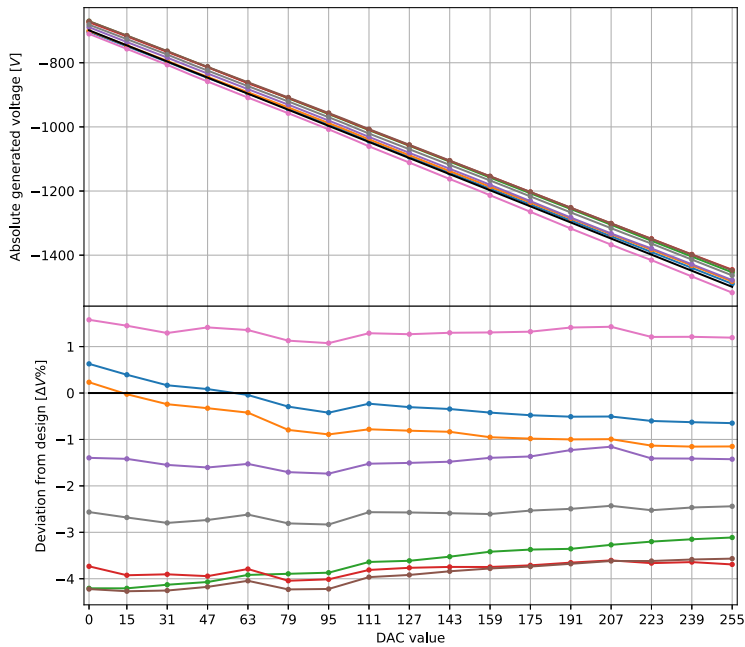
where  $D$  is the DAC value (0 to 255),  $V_{\text{ref}}$  is the reference voltage generated by the Cockcroft Walton multiplier feedback control ASIC (1.21 V),  $V_{\text{min}}$  and  $V_{\text{max}}$  are the minimum and maximum output voltages of the DAC (1.91 and 2.71 V, respectively), and  $F$  is the feedback path voltage divider factor, which has been set to 1000.  $V_{\text{HV}}$  is the HV generated by the circuit. From this, it follows a range variation of the design output between  $-698.8$  and  $-1498.8$  V for DAC values 0 and 255, respectively. The observed variation among a sample of PMT bases in Fig. 19 is due to resistor tolerances present in the feedback loop, which total to a maximum of  $\pm 6\%$ . The nonlinearity and general offset with respect to the design voltage in the plot is due to the inherent error of the measurement method.

## 5 Signal Collection Board

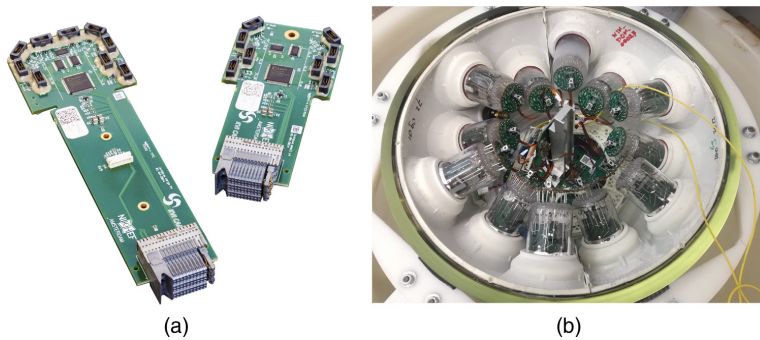
The PMT base-generated LVDS signals are collected on a hub board, called the SCB. The main function of the SCB is to transfer the signals from the PMT base to the TDCs embedded in the CLB. The SCB also transfers the I<sup>2</sup>C command signals from the CLB to the PMT bases in order to monitor and control the PMTs. Each DOM comprises two SCBs, one large and one small [Fig. 20(a)]. Figure 20(b) shows one SCB connected to the PMT bases in half a DOM. The architecture of the SCB consists of the following parts:

- Backplane connector to the CLB.
- Xilinx Coolrunner complex programmable logic device (CPLD).
- I<sup>2</sup>C multiplexer.
- Current limit switches.
- PMT channels: 19 in the large SCB and 12 in the small SCB.
- One piezo connector (only in the large SCB).

LVDS signaling, as used between the PMT base and the CLB, is less susceptible to cross-talk due to the fact that the two



**Fig. 19** HV produced by a sample of PMT bases against a set PROMiS DAC value. The top plot shows the absolute voltage for eight selected bases, while bottom plot shows the relative deviation from the design voltage, where  $\Delta V\% = (V_{\text{DAC}} - V_{\text{design}}) / V_{\text{DAC}} \times 100$ . The black line represents the design value.



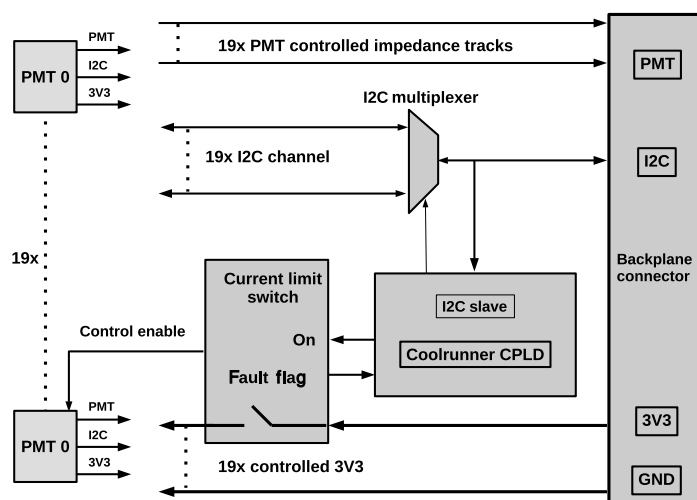
**Fig. 20** (a) Small and large signal collection boards. (b) Small SCB mounted next to the cooling stem, connected to 12 PMTs inside the top half of a DOM.

signal lines of the LVDS are electrically tightly coupled with matched impedance throughout the complete route from the PMT base to the CLB. The signal that can be coupled into the LVDS line will be coupled into both signal lines at the same time. Because of this, the distortion becomes common mode and will not affect the signal integrity. For each PMT, a resettable fuse IC, integrated on the SCB, protects individual PMTs and the CLB from short circuit or excessive current draw. For control and monitoring of the SCB, a CPLD, accessible through I<sup>2</sup>C, has been added. The CPLD allows for reading and resetting the current sensors and disabling the PMT base digital clock to eliminate possible interferences from this clock on the PMT

signals. The acoustic piezo sensor is also connected to the CLB via the large SCB. As in the case of the PMTs, the SCB supplies the piezo with the needed voltage and transfers the acquired data from the piezo sensor to the CLB. The piezo does not feature a control interface.

The large SCB has 19 equal channels (see Fig. 21). The LVDS signals and the 5 V needed to supply the acoustic piezo sensor are connected from the backplane connector to the piezo connector.

The 5-V power is not measured and cannot be switched by the SCB. The small SCB has 12 PMT channels and three spare channels.



**Fig. 21** Block diagram of the 19 PMT channel interface of the large SCB. The small SCB is analogous with only 12 channels.

## 6 DOM Power Breakdown

The power consumption breakdown of the most consuming DOM electronics boards is shown in Table 4. The component of the DOM with the highest power consumption is the CLB. Inside the CLB, the FPGA and the SFP are the main power consumers, followed by the clock conditioner and the nanobeacon. The nanobeacon is only operated when a calibration run is performed, typically a few minutes once a week.

The SCB consumption is negligible and the 31 PMT bases add up to a total of 1 W. The power board, mainly because of the dc/dc converter losses, accounts for 10.2% of the total DOM

power consumption. In total, the power consumption of the DOM is around 7 W when fully operational. Keeping the power drain low is important both for keeping the overall consumption of the detector low and minimizing the heat production.

## 7 Reliability

Maintenance of DU operated in deep seawater is difficult. In order to quantify the reliability of the electronics boards used in the detector, the FIDES<sup>28</sup> method is used. The FIDES methodology provides two main engineering tools. The first one consists of a handbook for predicting the reliability of the electronic boards analyzed. The second one is a guide to estimate the impact of the design and manufacturing processes on the reliability of the produced boards. FIDES provides a spreadsheet tool to calculate the failure in time (FIT) and the mean time to failure (MTTF) of an electronics board. Given a board, each of its components is assigned an FIT, which is either provided by the manufacturer or obtained from the FIDES handbook. The final FIT of a board is the sum of the FITs of each single component and estimates the failure rate per  $10^9$  hours. Once the FIT is obtained, it is possible to calculate the probability of failure in a given time as  $F(t) = 1 - R(t)$ , with  $R(t)$  the probability of a system to still be operational over a time period  $t$ .  $R(t) = e^{-\lambda t}$ , where  $\lambda$  is the board FIT value and  $t$  the time period duration in hours.

The results obtained for the DOM electronics boards are presented in Table 5. To fully quantify the reliability of the boards, it is necessary to evaluate each subsystem included in order to exclude, from the total FIT, those subsystems that are not critical or do not affect the overall performance of the detector in case of failure. The evaluation is called the failure mode, effects, and criticality analysis (FMECA). In the case of the power board, FMECA analysis has shown that the failure of the nanobeacon and piezo power supplies has no impact in the overall physics performances of the KM3NeT detector, because there is enough redundancy. Once adjusted, the power board FIT reduces to 947. The results obtained by the FIDES method show that the

**Table 4** DOM measured power breakdown.

Power breakdown		
Board	Subcomponent	Power (W)
Power board		0.72
CLB		4.45
	FPGA	2.25
	SFP	1.50
	Clock conditioner	0.50
	Tilt and compass	0.20
Small SCB		0.02
Large SCB		0.02
PMT 31x		1.05
Digital Piezo		0.50
Total power consumption		6.76

**Table 5** FIT and MTTF of the DOM electronics boards of KM3NeT. FIT is defined as the number of failures per  $10^9$  h.

Product	FIT	MTTF (years)
PMT base	1218	94
Large SCB	157	727
Small SCB	156	731
Power board	1424	80
CLB	417	273

electronics boards in the DOM comply with the quality levels required by the KM3NeT collaboration.

## 8 Conclusions

In this paper, the electronics front-end and readout system of the KM3NeT telescopes has been presented. The main electronics boards inside the optical modules: the CLB, the power board, the PMT bases, and the SCBs—have been described in detail, including a description of the readout architecture of the front-end electronics. A challenging requirement of the readout system is the 1-ns accuracy of the synchronization of the clocks inside the individual optical modules deployed in a water volume of about one-cubic kilometer scale. An additional challenge is the power budget of maximal 7 W, including the HV of the 31 3-in. PMTs. The full chain of the readout electronics has been successfully qualified *in situ* during a data-taking period from May 2014 to July 2015 at a depth of about 3500 m. The qualification has shown that a sustainable synchronization of 1-ns accuracy between the clocks in the individual optical modules has been achieved. Currently, the first deployed DUs, using the first batch of mass-produced DOM electronics, have been taking data successfully, thus demonstrating the functionality of the KM3NeT front-end and readout electronics system.

## Acknowledgments

The authors acknowledge financial support from the funding agencies: Agence Nationale de la Recherche (Grant No. ANR-15-CE31-0020), Centre National de la Recherche Scientifique (CNRS), Commission Européenne (FEDER fund and Marie Curie Program), Institut Universitaire de France (IUF), IdEx program and UnivEarthS Labex program at Sorbonne Paris Cité (Grant Nos. ANR-10-LABX-0023 and ANR-11-IDEX-0005-02), Paris Île-de-France Region, France; Shota Rustaveli National Science Foundation of Georgia (SRNSFG, Grant No. FR-18-1268), Georgia; Deutsche Forschungsgemeinschaft (DFG), Germany; The General Secretariat of Research and Technology (GSRT), Greece; Istituto Nazionale di Fisica Nucleare (INFN), Ministero dell'Istruzione, dell'Università e della Ricerca (MIUR), PRIN 2017 program (Grant NAT-NET 2017W4HA7S) Italy; Ministry of Higher Education, Scientific Research and Professional Training, Morocco; Nederlandse organisatie voor Wetenschappelijk Onderzoek (NWO), the Netherlands; The National Science Centre, Poland (2015/18/E/ST2/00758); National Authority for Scientific Research (ANCS), Romania; Plan Estatal de Investigación [refs. FPA2015-65150-C3-1-P, -2-P and -3-P, (MINECO/FEDER)], Severo Ochoa Centre of Excellence program (MINECO), Red

Consolider MultiDark (ref. FPA2017-90566-REDC, MINECO), and Prometeo and Grisolia programs (Generalitat Valenciana), “la Caixa” Foundation (ID 100010434) through the fellowship LCF/BQ/IN17/11620019, and the European Union’s Horizon 2020 research and innovation programme under the Marie Skłodowska-Curie Grant Agreement No. 713673, Spain.

## References

1. J. Brunner, “KM3NeT-ORCA,” in *PoS NEUTEL2017* (2018).
2. R. Coniglione, “KM3NeT-ARCA project status and plan,” in *EPJ Web Conf.* (2016).
3. S. Adrián-Martínez et al. [KM3NeT Collaboration], “Letter of intent for KM3NeT 2.0,” *J. Phys. G* **43**(8), 084001 (2016).
4. M. Circella, “The digital optical module (DOM) for the KM3NeT detector,” in *Proc. 33rd ICRC*, Rio de Janeiro (2013).
5. E. Leonora et al. [KM3NeT Collaboration], “Design and production of the digital optical module of the KM3NeT project,” in *EPJ Web Conf.*, vol. 136, p. 4008 (2017).
6. D. Real, “The electronics readout and data acquisition system of the KM3NeT neutrino telescope node,” *AIP Conf. Proc.* **1630**, 102–105 (2014).
7. J. Serrano et al., “The White Rabbit project,” in *Proc. IBIC*, Oxford (2013).
8. S. Aiello et al. [KM3NeT Collaboration], “Characterisation of the Hamamatsu photomultipliers for the KM3NeT neutrino telescope,” *J. Instrum.* **13**, P05035 (2018).
9. S. Adrián-Martínez et al. [KM3NeT Collaboration], “The prototype detection unit of the KM3NeT detector,” *Eur. Phys. J. C* **76**, 1–12 (2016).
10. M. Ageron et al. [KM3NeT Collaboration], “Measurement of the atmospheric muon rate dependence on the sea depth with the KM3NeT neutrino telescopes,” arXiv:1906.02704v2.
11. P. Musico, “The central logic board for the optical module of the KM3NeT detector,” in *PoS TIPP2014(2014) 372*, *Proc. 34th ICRC*, Amsterdam (2014).
12. S. Biagi and A. Orzelli, “The central logic board and its auxiliary boards for the optical module of the KM3NeT detector,” *J. Instrum.* **9**, C12033 (2014).
13. D. Real et al., “Nanobeacon and laser beacon: KM3NeT time calibration devices,” in *PoS TIPP2014 (2015) 365*, *Proc. 3th TIPP*, Amsterdam (2014).
14. Lattice, “LatticeMico32 Processor,” *Reference Manual*, Lattice Semiconductor, [http://www.latticesemi.com/view\\_document?document\\_id=52077](http://www.latticesemi.com/view_document?document_id=52077) (2012).
15. E. Bogatin, *Signal and Power Integrity—Simplified*, 2nd ed., Prentice Hall, PTR, Upper Saddle River, New Jersey (2009).
16. S. Biagi et al., “The data acquisition system of the KM3NeT detector,” in *PoS ICRC2015 (2016) 1172*, *Proc. 3th TIPP*, The Hague (2015).
17. R. R. Balwaik, “Open-source 32-Bit RISC soft-core processors,” *IOSR J. VLSI Signal Process.* **2**(4), 43–46 (2013).
18. R. Herveille, *WISHBONE System-on-Chip (SoC) Interconnection Architecture for Portable IP Cores*, Specifications, [https://opencores.org/cdn/downloads/wbspec\\_b3.pdf](https://opencores.org/cdn/downloads/wbspec_b3.pdf) (2002).
19. M. Lipinski et al., “White Rabbit: a PTP application for robust sub-nanosecond synchronization,” in *IEEE ISPCS Proc.*, vol. 25 (2011).
20. R. Coniglione, “KM3NeT time calibration,” in *PoS ICRC2019 (2019) 868*, *Proc. 36th ICRC*, Madison (2019).
21. A. Enzenhofer, “Combined opto-acoustical sensor modules for KM3NeT,” in *AIP Conf. Proc.*, Vol. **1535**, 185 (2013).
22. M. Bouwhuis, “White Rabbit in KM3NeT,” in *9th White Rabbit Workshop* (2016).
23. A. Belias, “Design and development of the power supply board within the digital optical module in KM3NeT,” in *PoS TIPP2014 (2014) 188*, *Proc. 3rd TIPP*, Amsterdam (2014).
24. Xilinx Company, “Kintex-7 FPGAs data sheet: DC and AC switching characteristics,” [https://www.xilinx.com/support/documentation/data\\_sheets/ds182\\_Kintex\\_7\\_Data\\_Sheet.pdf](https://www.xilinx.com/support/documentation/data_sheets/ds182_Kintex_7_Data_Sheet.pdf) (2019).
25. P. Timmer et al., “Very low power, high voltage base for a photo multiplier tube for the KM3NeT deep sea neutrino telescope,” *J. Instrum.* **5**, C12049 (2010).

26. S. Adrián-Martínez et al., “A method to stabilise the performance of negatively fed KM3NeT photomultipliers,” *J. Instrum.* **11**, P12014 (2016).
27. D. Gajanana et al., “ASIC design in the KM3NeT detector,” *J. Instrum.* **8**, C02030 (2013).
28. P. Pougnet et al., “Reliability prediction of embedded electronic systems: the FIDES guide,” in *Embedded Mechatron. Syst.*, pp. 185–211 (2015).

**Vincent van Beveren** is a PhD candidate and embedded software engineer at the National Institute for Subatomic Physics Nikhef. He received his BS degree in computer science and information technology from the Hogeschool Utrecht in 2004. He has collaborated on multiple publications on various topics. His areas of expertise are ultralow power embedded systems, digital signal processing, and internet of things.

**David Calvo** is a PhD candidate and research engineer at the Instituto de Física Corpuscular of Valencia. He received his MS

degree in computing from the University Jaume I in 2006, his MS degree in electronics from the University of Valencia in 2009, and his MS degree in electronic systems design from the Polytechnic University of Valencia in 2012. His research interests are focused on digital electronics, synchronization, and readout acquisition systems. He is the author of several publications on electronics.

**Diego Real** is a PhD candidate and research engineer at the Instituto de Física Corpuscular. He received his BS degree in electronics in 1996 and his MS degree in control and electronics in 2000, both from the Polytechnic University of Valencia. He is the author of several publications on electronics. His current research interests include acquisition and synchronization systems for particle physics. He has been the electronics project leader of the KM3NeT telescope and a member of the technical advisory board of the GVD-Baikal telescope since 2013.

Biographies of the other authors are not available.





# Bloque III

---

Conclusiones



## 7.1 Objetivos de la tesis

La presente tesis se enmarca dentro de la tecnología de los telescopios de neutrinos siendo sus objetivos principales, por un lado, el estudio y diseño de la instrumentación de calibración temporal para telescopios de neutrinos, y por otro lado, el diseño de la electrónica de adquisición del telescopio KM3NeT. Los telescopios de neutrinos se basan en la detección de la luz Cherenkov inducida por las partículas cargadas que se producen en las interacciones de los neutrinos en un medio transparente. Una pequeña fracción del flujo de neutrinos interacciona con la materia que se encuentra alrededor de los detectores, generando trazas de luz Cherenkov, las cuales proporcionan información sobre el neutrino original.

Por ello, los telescopios actuales se construyen en grandes volúmenes de hielo o agua, tal es el caso de KM3NET y ANTARES, debido tanto a las características ópticas del medio en el que se sitúa el telescopio como a su elevada densidad, ya que permite tanto la transmisión de la luz de Cherenkov generada como el aumento de la probabilidad de interacción de los neutrinos. Para la correcta identificación de las trazas es necesario poder adquirir en cada uno de los detectores que componen el telescopio el tiempo de llegada (*arrival time*) de los fotones Cherenkov. Esto se realiza por parte de la electrónica de adquisición, cuyo estudio para el caso del telescopio de KM3NeT es objeto también de la presente tesis. Por otra parte, para proporcionar una medida adecuada, los diferentes detectores deben de estar sincronizados con la suficiente precisión. La sincronización se consigue mediante la distribución de un reloj principal hacia cada uno de los nodos, que en el caso de KM3NeT forma parte del sistema de adquisición. Sin embargo, como la señal de reloj solo llega hasta la tarjeta de adquisición, son necesarios otros métodos de calibración in-situ para sincronizar el tiempo

entre la llegada de los fotones al fotocátodo y la digitalización de la señal que producen.

Los principales métodos utilizados para la calibración temporal, además del sistema de reloj, son:

- La utilización de muones descendentes
- La utilización de las coincidencias producidas por las emisiones radioactivas de Potasio 40 presente en el agua
- La utilización de fuentes de luz pulsada

El desarrollo de los instrumentos que implementan este último método forman parte también de la presente tesis. Al saber el tiempo de emisión de las fuentes de luz, la posición de cada uno de los detectores y el tiempo de llegada de la luz emitida a cada uno de los detectores del telescopio iluminados por la instrumentación utilizada, es posible realizar las medidas y correcciones pertinentes para conocer el nivel de sincronización.

Por lo que respecta a la instrumentación de calibración temporal, en la Sección 7.2 se presentan los instrumentos utilizados tanto en el telescopio ANTARES como su evolución tecnológica hacia el telescopio KM3NeT, mientras que la Sección 7.3 se trata la electrónica de adquisición de KM3NeT.

## 7.2 Instrumentación de calibración temporal para telescopios de neutrinos

### 7.2.1 ANTARES

En ANTARES son dos los instrumentos utilizados en la calibración temporal in-situ, los llamados *optical beacons*, diferenciados entre sí por la fuente de luz utilizada. En ambos casos se trata de fuentes de luz pulsadas, si bien en un caso se utilizan fuentes de luz láser (*laser beacon*) y en el otro diodos leds (*led beacon*). El *laser beacon* emite pulsos de luz del orden del nanosegundo muy energéticos permitiendo llegar a una distancia mayor que los *led beacons*. Por este motivo, su aplicación principal en ANTARES ha

sido la de calibrar líneas entre sí (*interline calibration*), ya que los fotones emitidos por el láser instalado en la base de una línea son capaces de alcanzar líneas adyacentes.

El *laser beacon* consta de un contenedor de titanio capaz de resistir las presiones existentes hasta una profundidad de 3500 m. El contenedor está formado por tres piezas principales: el tubo central y dos tapas. En una de las tapas se incluye un penetrador metálico, sellado a la tapa mediante juntas tóricas, con el cual se interconecta el *laser beacon* con el resto de la infraestructura marina proporcionando comunicación, alimentación y la salida del fotomultiplicador que lleva incorporado la cabeza de láser y que proporciona una señal síncrona con la emisión del pulso de luz. En la otra tapa se incluye una “ventana” por la cual puede salir el haz del láser. La “ventana” consiste en un cilindro de cuarzo transparente. Antes de entrar en el cilindro, la luz pasa por un difusor lambertiano, de manera que la luz sale por las paredes del cilindro una vez refractada.

El *led beacon* utiliza como fuentes de luz diodos led. Esta fuente de luz tiene menor intensidad con lo que su alcance es menor. Debido a este factor, el *led beacon* se ha utilizado principalmente en ANTARES para la calibración de OMs dentro de una misma línea (*intraline calibration*). En el caso del *led beacon*, los pulsos de luz generados tienen una mayor anchura, normalmente del orden de los 4-5 ns (FWHM) con un tiempo de subida del orden de los 2-3 ns. El circuito pulsador está basado en el circuito Kapuscinski, en el que dos transistores interconectados generan el pulso eléctrico que estimula al diodo led durante la transición de los transistores de abierto a cerrado y viceversa. De este modo, se consigue un pulso eléctrico muy estrecho que a su vez genera un pulso óptico de similares características.

En ANTARES, un *led beacon* está constituido por 36 diodos led y sus correspondientes circuitos pulsadores, organizados en tarjetas con 6 diodos leds, las llamadas *faces* o caras, formando un hexágono. Cada una de las caras contiene tres grupos diferentes: Un grupo está compuesto por un solo diodo led apuntando hacia la parte superior del *led beacon*; otro grupo está también compuesto de un solo diodo led, en la parte central de la tarjeta y apuntando hacia el lateral del *led beacon*; y el último grupo, que se compone

de cuatro diodos leds, apuntando, como en el caso anterior, al lateral del *led beacon*.

Las seis tarjetas electrónicas se colocan en una estructura hexagonal que se fija mediante tornillos a una de las partes del contenedor de titanio y cristal que forma el envoltorio exterior del *led beacon*. La mayor parte del contenedor es de cristal, formado por dos partes, siendo únicamente de titanio los anillos que sirven para fijar las partes de cristal. El *led beacon* consta, al igual que el *laser beacon*, de un penetrador, esta vez realizado sobre el mismo cristal, a través del cual se interconecta con el resto de la infraestructura marina de ANTARES.

### 7.2.2 Mejoras del *laser beacon* de ANTARES

Para ANTARES se desarrolló una nueva versión del *laser beacon*. A diferencia de las fuentes led, donde la intensidad se puede variar cambiando el voltaje aplicado, la cantidad de luz emitida por las primeras versiones de *laser beacon* era fija. Para poder variar la luz emitida se añadió un atenuador controlado por tensión. Este atenuador utiliza un retardador variable de cristal líquido colocado en el paso del haz del láser. Los retardadores de cristal líquido consisten en una capa muy delgada colocada en una pequeña cavidad de paredes paralelas de sílice fundido. La anisotropía de las moléculas de cristal líquido causa su birrefringencia. Cuando se aplica un voltaje a las moléculas, estas se alinean paralelas al campo eléctrico. Cuanto mayor es el voltaje, mayor es la birrefringencia y el retraso de las fases ópticas. Esto permite el ajuste eléctrico de un haz de luz polarizado. Como la luz del láser está polarizada, la atenuación se puede conseguir mediante la combinación de un retardador variable de cristal líquido y un polarizador lineal. La polarización lineal se obtiene utilizando un divisor de haz consistente en dos prismas de 90 grados donde la hipotenusa de uno de los prismas está recubierto por una capa dieléctrica que realiza las funciones de división del haz polarizado. El haz incidente se divide en dos componentes ortogonales de tal manera que la componente de la luz polarizada en uno de los ejes se transmiten mientras que la componente del otro eje se refleja. La razón de utilizar un cubo polarizador de división de haz es que presenta una mayor resistencia y, por tanto, una mayor duración

cuando se le expone a un haz de luz de láser que la de un polarizador lineal estándar.

Otra de las mejoras con respecto al primer diseño de ANTARES ha sido la utilización de un nuevo modelo de láser. En este caso se optó por un láser de diodo bombeado pulsado de tipo Q-switch de Nd YAG que proporciona pulsos de una duración de 400 ps (FWHM) con una energía total de 3.5  $\mu\text{J}$ , alrededor de unas 2.7 veces más que el anterior modelo de láser con lo cual se aumenta considerablemente su rango de alcance. La longitud de onda emitida de este nuevo modelo es idéntica a la anterior después de doblar la frecuencia original del Nd-YAG de 1064 nm para generar pulsos de 532 nm. También es posible modificar la frecuencia de emisión de pulsos entre 100 Hz y 2000 Hz.

### 7.2.3 KM3NeT

Este mismo modelo de *laser beacon* se ha propuesto para KM3NeT, estudiando también fuentes de luz aún más energéticas. Para su validación se instalaron prototipos tanto en ANTARES como en las torres de NEMO.

En el caso del *led beacon* en KM3NeT, partiendo de la experiencia previa de ANTARES, y con objeto de disminuir coste y consumo de potencia se ha realizado una revisión del diseño. Se ha miniaturizado el circuito pulsador, reduciéndose a un único diodo led que se ha integrado en el DOM de KM3NeT, de manera que apunta verticalmente hacia otros DOMs de la misma línea (DU). Esto evita la construcción de un contenedor propio y sus cables de interconexión disminuyendo considerablemente el coste. Por otra parte, cada DOM consta de un nanobeacon -término con el que se denomina en KM3NeT a esta nueva instrumentación-. A su vez, el diodo led no se ha modificado como en ANTARES. La modificación permitía aumentar el cono de emisión de la luz emitida pero disminuía drásticamente su potencia. La ubicación de un nanobeacon en cada DOM, así como la mayor focalización del haz que en el caso de ANTARES, permiten tener suficiente redundancia en KM3NeT para realizar una calibración temporal de la DU mediante los nanobeacons.

Se han estudiado en el laboratorio diferentes modelos de led, realizándose medidas comparativas de anchura temporal, tiempo de subida y amplitud

del pulso óptico así como la distribución angular de la luz emitida. Como resultado de este estudio, se preseleccionaron cuatro modelos de led para KM3NeT, construyéndose un *led beacon* con estos modelos e instalándose en ANTARES para su prueba en este telescopio. Estos leds son más energéticos que los utilizados en ANTARES pero presentan una apertura angular inferior. Como ya se ha explicado anteriormente, a los leds de ANTARES se les cortaba la parte superior de la cobertura de plástico para aplanar su distribución angular y poder alcanzar también líneas vecinas. Como consecuencia de esta operación la energía emitida en el ángulo sólido original de emisión se reducía considerablemente. En el caso de KM3NeT se pretende que cada nanobeacon solo ilumine los DOMs de la misma DU situados por encima, por lo que no es necesario cortar la cobertura de plástico y se obtiene un alcance mucho mayor en la vertical. La electrónica del nanobeacon consta de dos componentes, la circuitería del pulsador y la electrónica de control. La electrónica de control se ha integrado en la CLB y la *Power Board* del DOM. El *trigger* se proporciona mediante un pulso de 1.5 V de amplitud y sobre 150 ns de duración superimpuesto sobre una señal continua variable entre 4 y 24 V. La componente de continua carga el condensador mientras que el flanco de subida del pulso de 1.5 V cambia el estado del par de transistores, disparando la rápida descarga del condensador de 100 pF a través del *path* de baja impedancia que incluye el led. La inductancia en paralelo desarrolla la carga en oposición al condensador que se descarga reduciendo su constante de tiempo. El nivel de continua determina la cantidad de corriente a través del led y por lo tanto la intensidad de emisión del led. La frecuencia típica de *trigger* está entre 1 kHz y 20 kHz. Para controlar el pulso del nanobeacon se proporcionan dos señales de control, una para fijar la intensidad de emisión del led y otra para fijar la frecuencia de pulsado. En una primera versión se desarrolló una tarjeta de control que proporcionaba estas dos señales, mientras que en un desarrollo posterior se integró en la Central Logic Board (CLB) y la *Power Board* (PB) de KM3NeT. La parte integrada en la CLB proporciona la señal del *trigger*, que se genera en la FPGA de la CLB, pudiéndose cambiar la frecuencia de emisión. El pulso se encuentra sincronizado con la señal de *Pulse Per Second* generado por White Rabbit y es posible retrasar el flanco de subida del pulso con respecto a la señal de *Pulse Per Second*. La *Power Board* incluye la parte que



genera la señal en continua que determina la intensidad del pulso. El voltaje se puede modificar mediante I<sup>2</sup>C hasta alcanzar el máximo de 30 V.

## 7.3 Electrónica de adquisición de KM3NeT

La luz Cherenkov generada por las partículas secundarias producidas por la interacción de neutrinos se detecta mediante una matriz de DOM. Cada DOM consiste en una esfera hueca de cristal resistente a la alta presión con en cuyo interior se distribuyen 31 fotomultiplicadores de tres pulgadas distribuidos alrededor de la esfera de cristal, los cuales recogen la luz Cherenkov y la transforman en señales electrónicas. Los 18 DOMs que componen una DU están organizados en estructuras similares a líneas ancladas en el suelo marino que se mantienen verticales mediante un sistema de boyas en la parte superior.

El principal concepto en el que se inspira la adquisición en KM3NeT es el *all-data-to-shore*, que sigue el mismo principio que en ANTARES. Mediante este concepto no se produce ningún tipo de *trigger* en los módulos sumergidos sino que todas las señales de los PMTs se envían a la estación de control de la costa, donde el proceso de *trigger* se realiza en una granja de procesadores. Es este, por tanto, el principio fundamental con el cual se ha diseñado e implementado la electrónica de adquisición.

Dentro del DOM, los 31 PMTs se ubican en una estructura de nylon, 19 PMTs en el hemisferio inferior y los restantes 12 en el hemisferio superior. Una estructura de aluminio proporciona la conducción y posterior disipación de calor entre la electrónica de adquisición situada en el interior del DOM y el exterior de la esfera. Las diferentes tarjetas que componen la electrónica de adquisición del DOM de KM3NeT, objeto de esta tesis, se detallan a continuación.

### 7.3.1 Power Board

La *Power Board* (PB) proporciona la alimentación a todo el DOM, incluyendo los PMTs, la electrónica de adquisición y la instrumentación. La alimentación

de la *Power Board* son 12 V que vienen del exterior del DOM. De esta entrada se generan seis voltajes regulados (1, 1.8, 2.5, 3.3, 3.3 PMT y 5V) utilizando convertidores DC/DC. Los voltajes de 1, 1.8, 2.5 y 3.3 V se usan para alimentar la FPGA de la CLB. El voltaje de 3.3 V PMT alimenta las 31 bases de los PMTs y el voltaje de 5 V se utiliza para alimentar el sensor piezo acústico.

Además, la *Power Board* proporciona otra salida, configurable via I2C, que se puede configurar desde 0 a 30 V y es utilizada por el nanobeacon. Los convertidores DC/DC utilizados son de alta eficiencia para minimizar el consumo del DOM. La *Power Board* se sitúa en la parte apantallada del disipador térmico con lo que además de proporcionar una buena refrigeración a esta tarjeta, aísla al resto de la electrónica del DOM de las interferencias de alta frecuencia.

Una de las funciones de la *Power Board* es proporcionar la secuencia de inicio de los voltajes de la FPGA. Para este propósito la *Power Board* incorpora un secuenciador que proporciona la secuencia de voltajes deseados. También se dispone de dos señales de *power-good*. La primera indica que el voltaje de 3.3 V utilizado por los PMTs se ha iniciado correctamente. La segunda señal indica que se han inicializado correctamente todos los voltajes. Otra de las funcionalidades incluye un bucle de histéresis que evita las inestabilidades durante el arranque. Los reguladores de la *Power Board* se activan solo cuando el voltaje de entrada supera los 11 V, mientras que se desactivan cuando el valor de entrada cae por debajo de 9.5 V. De este modo se evitan las fluctuaciones en los reguladores de la *Power Board* al inicio.

### 7.3.2 Signal Collection Board

La SCB (Signal Collection Board) es la tarjeta encargada de recoger las señales LVDS provenientes de las bases de los PMTs, y conducir las a los TDCs implementados en la CLB. La SCB también transfiere los comandos I<sup>2</sup>C desde la CLB a las bases de los PMTs para monitorizar y controlar los PMTs. Cada DOM tiene dos SCBs, una para el hemisferio inferior (SCB larga) y otra para el hemisferio superior (SCB corta).

Los principales subsistemas de la SCB son:

- El conector de backplane a la CLB

- Una Xilinx Coolrunner CPLD (Complex Programmable Logic Device)
- Un multiplexor I<sup>2</sup>C
- Un interruptor de limitación de corriente
- 19 canales de PMT en la SCB larga y 12 en la corta
- En el caso de la SCB larga, un conector para el sensor piezo acústico

En las SCBs se utilizan líneas LVDS cuyas dos líneas de señal están acopladas eléctricamente en todo el camino desde los PMTs a la CLB, con lo que se reduce la susceptibilidad al fenómeno de *cross-talk*.

Para cada PMT, un fusible reinicializable, integrado en la SCB, protege tanto a cada PMT como a la CLB de un cortocircuito o de un consumo excesivo de corriente. Una CPLD controlable por I2C lee los sensores de corrientes y puede deshabilitar el reloj digital de la base del PMT para eliminar posibles interferencias de este reloj en las señales del PMT. El sensor acústico está también conectado a la CLB a través de la SCB larga. Como en el caso de los PMTs, la SCB proporciona al sensor piezo acústico los voltajes necesarios y transfiere los datos adquiridos del sensor a la CLB.

### 7.3.3 Central Logic Board

La CLB (Central Logic Board) es la principal tarjeta electrónica del sistema de adquisición de KM3NeT. La base del PMT genera señales LVDS al tratar los pulsos eléctricos del PMT. Las SCBs reciben y distribuyen estas señales a la CLB, donde son digitalizadas por los TDCs implementados en la FPGA con una resolución de un nanosegundo. Después de organizar y añadir el sello de tiempo de llegada de las señales, los datos adquiridos por los TDCs se envían a la estación de control de la costa para su procesamiento posterior y almacenamiento.

La CLB también incorpora una brújula y un inclinómetro, tres sensores de temperatura y un sensor de humedad. Además, proporciona una conexión para un pulsador led del nanobeacon y para el sensor piezo acústico que se conecta con la CLB a través del hemisferio inferior. El control de la CLB se consigue mediante un software a medida que se ejecuta en un procesador empujado en la lógica programable de la FPGA de la CLB.

### 7.3.3.1 CLB Hardware

La tarjeta impresa (PCB, Printed Circuit Board) de la CLB tiene doce capas, seis de ellas están dedicadas a la transmisión de las señales, dos a los planos de alimentación, mientras que las restantes cuatro capas son planos de masa. Las capas de masa envuelven a los planos de alimentación para reducir las interferencias electromagnéticas procedentes de la alimentación y para mejorar la integridad de la señal. Por la misma razón, el número de vías en estas capas se ha reducido al máximo posible. El componente principal de la CLB es una FPGA de la familia Kintex-7 de Xilinx, elegida por su consumo relativamente bajo. Otros componentes relevantes son: la memoria flash, que comunica via SPI con la FPGA y guarda cuatro de las imágenes de la FPGA junto con los parámetros de configuración de la CLB; los osciladores programables, los cuales proporcionan las señales de reloj necesitadas por el protocolo White Rabbit, y dos conectores “*press-fit*”, que proporcionan una sólida conexión mecánica y eléctrica entre la CLB y las SCBs. La CLB incluye un cristal oscilador de 25 MHz. La señal del oscilador se transfiere a cada uno de los *buffers* de la FPGA, y luego se distribuye a la PLL interna de la FPGA para generar los dos relojes de 250 MHz desfasados 90 grados que necesita el core de los TDCs. El principal elemento para comunicar con la estación de control de la costa es el *transceiver* SFP, el cual interacciona la electrónica con el sistema óptico.

### 7.3.3.2 Firmware

El *firmware* se ejecuta en la FPGA de la CLB y sus principales componentes son: el procesador empotrado LM32, sobre el que se ejecuta el software de control y monitorización de la CLB; el core PTP de White Rabbit, el cual implementa el protocolo White Rabbit; los TDCs, los cuales digitalizan las señales del PMT que llegan a la CLB; los cores de la máquina de estados; el IPMUx, que recoge los datos de los TDCs y los datos de monitorización generados por el LM32 y los envía por *Ethernet* a la estación de control de la costa, y el core de *multiboot*, que permite la configuración remota segura del *firmware* de la FPGA.

### 7.3.3.3 Procesador empotrado

Como se ha explicado anteriormente, la lógica de la FPGA de la CLB implementa un microprocesador empotrado que incorpora una unidad de procesamiento central, una memoria de acceso aleatorio y periféricos para comunicación de los tipos UART, SPI e I2C. El procesador elegido es el LM32 de Lattice ya que utiliza menos recursos de la FPGA que otras CPUs y consta de una interfaz del bus *wishbone*. El LM32 también se emplea por parte del WRPC, con lo cual se simplifica la integración y la complejidad del diseño. La CPU funciona a 62.5 MHz y tiene 128 KB de memoria RAM para programa y datos.

### 7.3.3.4 State machine

La adquisición de datos está organizada en periodos de tiempo consecutivos, denominados *timeslices*. El core de la máquina de estados orquesta la adquisición de datos de la CLB. En primer lugar, es la responsable de generar el inicio periódico de la señal de la *timeslice*. Esta señal está sincronizada con el inicio del segundo UTC y se repite al inicio de cada periodo. Todos los datos que adquiere sincronizan su adquisición a la señal de inicio de la *timeslice* y todos los datos adquiridos se segmentan y se referencian temporalmente con respecto a ella. Por otra parte, la máquina de estados es la responsable de reunir los datos adquiridos y unirlos al tiempo UTC de inicio de la *timeslice*, llamado supertiempo. Al unir los tiempos relativos de inicio de la *timeslice* y el supertiempo de inicio de *timeslice* de la estación de control de la costa, puede determinarse con precisión de un nanosegundo el tiempo de llegada de las señales. Una vez los datos adquiridos han sido procesados, la última de las responsabilidades de la máquina de estados es la de distribuirlos hacia el generador de paquetes UDP, el llamado IPMux. Los datos se trocean en tramas de tal modo que se pueden empaquetar en *jumbo frames*. Se prepara también un encabezado con metadatos tales como el identificador de envío o el número de *run*.

### 7.3.3.5 TDCs

Los TDCs muestrean las señales de las bases de los PMTs. Están implementados, uno por PMT, en la FPGA de la CLB. El core de los TDCs mide tanto el

tiempo de llegada del pulso como su duración, denominado ToT (Tiempo sobre el umbral - *Time over Threshold*) en KM3NeT, utilizando para ello el tiempo que proporciona el core de White Rabbit con un nanosegundo de precisión. El core de los TDCs produce 48 bits por evento, donde los ocho primeros bits más significativos se utilizan para la identificación de los PMTs, los siguientes 32 codifican el tiempo de llegada del evento con respecto al tiempo de inicio de la *timeslice* y los últimos 8 bits codifican la duración. Los eventos se mandan a la máquina de estados, explicada en el apartado anterior, la cual también organiza la adquisición de los TDCs en *timeslices*.

El sistema de relojes de la FPGA se deriva de un oscilador de cuarzo de 25 MHz. La señal de reloj se transfiere a una PLL digital que genera la frecuencia del sistema de 62.5 MHz. El protocolo White Rabbit ajusta la fase y la frecuencia del sistema de reloj de la FPGA al reloj máster de referencia. Finalmente, el reloj ajustado se inyecta a la PLL de la FPGA para generar los dos relojes de 250 MHz, idénticos salvo que están desplazados 90 grados en fase. La entrada de los TDCs se sobremuestrea a un nanosegundo utilizando los flancos de subida y de bajada de los dos relojes de 250 MHz.

### 7.3.3.6 Adquisición de los datos del sensor piezo acústico.

La CLB también incluye un core para la adquisición de los datos del sensor piezo acústico. Al igual que con los datos de los PMTs, este core lee los datos del canal del sensor y les añade el correspondiente tiempo de llegada.

### 7.3.3.7 IPMux

Los paquetes creados por la máquina de estados se envían a uno de los puertos de entrada del IPMux, que realiza la función de selector del *buffer* de paquetes. El IPMux tiene diferentes puertos de entrada para cada fuente de datos. A cada paquete procedente de la máquina de estados, el IPMux le añade una cabecera UDP. El IPMux recibe también datos de la adquisición acústica, de la monitorización y de los canales de *slow control* del LM32. Todos ellos se agregan al IPMux y se transfieren al *endpoint* del core de

White Rabbit, donde son dirigidos y enviados a la estación de control de la costa.

Una vez llegan a la estación de control de la costa es posible diferenciar el origen de los datos (óptico, acústico, o de monitorización) por el número de puerto.

### 7.3.3.8 El core de Multiboot

Al iniciar la FPGA, esta se autoconfigura cargando la primera imagen válida que encuentra mientras escanea la memoria SPI. Hasta cuatro imágenes se pueden guardar en la memoria flash en posiciones de memoria subsecuentes, reservando las regiones de memoria por encima de estas imágenes para el almacenamiento de los parámetros de configuración de la CLB. El *multiboot* da acceso al bloque ICAP2 de Xilinx, el cual permite una reconfiguración de la FPGA con cualquier *offset* de memoria.

### 7.3.3.9 Software empotrado de la CLB

La FPGA contiene dos procesadores empotrados, un LM32 que incorpora el core de White Rabbit y un segundo LM32 añadido en la lógica de KM3NeT. El software del LM32 de White Rabbit ha sido desarrollado por la colaboración White Rabbit, pero ha sido adaptado a la topología de red de KM3NeT. El segundo LM32 controla el DOM. El software ha sido desarrollado por la colaboración KM3NeT y se ha diseñado como el software de control del detector KM3NeT. Las principales tareas realizadas por el software empotrado son:

- Inicializar, controlar y monitorizar el *hardware*
- Ejecutar los comandos enviados por la estación de costa
- Mandar la información de diagnóstico de vuelta a la costa
- Aplicar la actualizaciones del *firmware*

### 7.3.4 La base del PMT

La base del PMT se encarga tanto de la generación del alto voltaje que necesita el PMT como de la digitalización de las señales que produce el PMT. Antes de ser digitalizada la señal del PMT se amplifica en un pre-

amplificador. Uno de los principales componentes de la base del PMT es un comparador, que proporciona una señal lógica a alto nivel cuando la salida del PMT supera el límite del comparador, el cual se fija a través de I<sup>2</sup>C. La duración de la señal (ToT, Tiempo sobre el umbral - *Time over Threshold*) proporcionada por las bases de los PMTs se mide de forma precisa por los TDCs de la CLB.

Las 31 bases de los PMTs se conectan a la SCB mediante una PCB flexible. El Alto Voltaje - *High Voltage* (HV), que se configura de forma remota a través de I<sup>2</sup>C, se genera de forma independiente en cada una de las bases del PMT. Esto permite ajustar la ganancia individual de los PMTs para ecualizar la respuesta a los fotones y proporcionar un valor de ToT en torno a 26-27 ns para la detección de un único fotoelectrón. El valor del HV se puede ajustar remotamente en un rango que va desde -800 a -1400 V. Los PMTs están directamente acoplados a un circuito externo, por lo cual se utiliza un HV negativo. El HV se genera en un circuito multiplicador del tipo *Cockroft Walton*, manejado por un convertidor *flyback*. La salida del circuito multiplicador de voltaje se utiliza para alimentar los dínodos del PMT.

#### 7.3.4.1 ASICs de la base del PMT

Para reducir el espacio utilizado por la base del PMT, así como su coste y consumo se han desarrollado dos ASICs. El primero de los ASICs es el llamado PROMiS ASIC, el cual realiza el *readout* de las señales del PMT y tiene dos partes diferentes, una digital y otra analógica. El segundo chip es el ASIC CoCo, el cual controla la fuente de tensión de alto voltaje, proporcionando una ganancia del rango de 10<sup>6</sup>.

#### 7.3.5 Fiabilidad

El mantenimiento de las DUs instaladas en el fondo del mar es muy difícil, si no inviable, por lo que una alta fiabilidad es necesaria para garantizar el correcto funcionamiento de la electrónica durante la vida útil del experimento. Para cuantificar la fiabilidad de las tarjetas electrónicas del sistema de adquisición de KM3NeT se ha utilizado el método FIDES. Este método, desarrollado por un grupo de compañías europeas líderes en el sector aeroespacial y de defensa, proporciona dos herramientas. La primera consiste



en un *handbook* para predecir la fiabilidad de la electrónica utilizada. El segundo consiste en una hoja de cálculo para calcular el "fallo en tiempo" (FIT) y el "tiempo medio a fallo" (MTTF) de una tarjeta electrónica. El método FIDES se ha aplicado a las tarjetas del sistema de adquisición, obteniéndose el FIT y MTTF de ellas. El método FIDES ha ayudado a alcanzar y cuantificar la fiabilidad requerida por KM3NeT.



## Aportaciones realizadas

Conforme se ha descrito en el bloque anterior, se han desarrollado los sistemas de calibración óptica para el telescopio ANTARES, en concreto el *led beacon* y el *laser beacon*. A su vez se han puesto las bases para el desarrollo de los sistemas de calibración óptica del telescopio KM3NeT, desarrollando la instrumentación basada en leds, el dispositivo llamado nanobeacon, así como el desarrollo de los primeros prototipos de la instrumentación basada en láser, llamado igual que su homólogo en ANTARES, del cual deriva.

El dispositivo nanobeacon ha surgido de una evolución del *led beacon* de ANTARES, resultando tanto en una reducción del coste, importante en la construcción de telescopios de neutrinos de grandes volúmenes, como en un aumento de la fiabilidad. Al integrarse la instrumentación en el mismo DOM, con el resultante ahorro de un contenedor específico para esta instrumentación, se logra el objetivo de reducción de costes. Así mismo, al instalarse en todos los DOMs se consigue una considerable redundancia. El desarrollo de estas investigaciones ha resultado en la construcción de los instrumentos de calibración óptica que equipan las 12 líneas de ANTARES así como la producción de suficientes nanobeacons para posibilitar el montaje de los DOMs de las primeras líneas de KM3NeT.

También se ha desarrollado la arquitectura de la electrónica de adquisición de KM3NeT, supervisando todo el proceso y desarrollando los primeros prototipos de la electrónica de adquisición, los desarrollos *hardware*, *firmware* y *software* necesarios, así como su preparación para la producción masiva, incluyendo los diferentes análisis de fiabilidad para proporcionar la mejor calidad posible, algo necesario ya que la operación de los telescopios de neutrinos se realiza a varios kilómetros de distancia de la costa y más de 2000 m de profundidad y por tanto, no es posible la reparación o mantenimiento de los diferentes equipos. La electrónica desarrollada, fruto de la presente investigación, se ha utilizado en la primera fase de KM3NeT, donde se han producido tarjetas suficientes para la construcción de 31 DUs,

es decir 558 DOMs. Seis de las DUs se han instalado en ORCA y una en ARCA, validando tanto el diseño como el proceso de fabricación masiva.

## Líneas de investigación futuras

Una vez presentados los resultados obtenidos, se plantean las líneas futuras de investigación tanto en la instrumentación óptica como en la electrónica de adquisición.

Una de las líneas de investigación posibles trataría de reducir el ancho de banda utilizado por las unidades de detección básicas de los telescopios de neutrinos mediante la realización de un pretratamiento de datos. Este pretratamiento consiste en un análisis de las coincidencias en los PMTs del DOM, descartando o filtrando aquellos eventos sin valor físico. Para este filtrado se deberá revisar las características del *hardware* de adquisición de datos actual concluyendo si la electrónica actual es capaz de realizar este pretratamiento y en caso de serlo, qué funcionalidades se podrían implementar. De no ser posible habría que evaluar qué modificaciones serían necesarias para poder realizar este filtrado en los DOMs.

Otra de las posibles líneas de investigación consistiría en la mejora del nivel de sincronización obtenido por parte de la electrónica de adquisición. Para ello, se debería evaluar la calidad de los osciladores así como el *layout* de distribución de los relojes utilizados por White Rabbit, el protocolo utilizado por la electrónica de adquisición para realizar las tareas de sincronización, con el objeto de minimizar su *jitter* y mejorar así la calidad de la sincronización.

Y la última de las posibles líneas de investigación consistiría en la mejora de la fiabilidad de las tarjetas electrónicas de adquisición desarrolladas. Si bien en los trabajos presentados en esta tesis se han utilizado técnicas de evaluación de la fiabilidad teóricas, como lo es el método FIDES, sería recomendable la realización de Ensayos de Vida Altamente Acelerada - *Highly Accelerated Life Tests* y Ensayos de Filtrado con Stress Acelerado - *Highly Accelerated Stress Screen* para mejorar el diseño de las tarjetas desarrolladas y la calidad de las producciones en serie.

En cuanto a la instrumentación de calibración óptica se propone el análisis de la potencia óptica de emisión, de las características temporales de los pulsos ópticos y del espectro de emisión de leds con diferentes longitudes de onda. A fecha de hoy se han utilizado leds con una longitud de onda de 470 nm (azul), cerca del pico de menor absorción en el agua. La atenuación de la luz emitida en agua marina está fuertemente correlacionada con la longitud de emisión. Además las características de atenuación varían dependiendo de las condiciones del medio, por lo que se deberían utilizar fuentes de luz pulsada con diferentes longitudes de onda que previamente se deberían caracterizar.

## Referencias

- [1] W. Pauli. ‘Structure et Propriétés des Noyaux Atomiques’. In: *Rapp. Septième Conseil Phys. Solvay, Brussels, 1933 (Gauthier-Villars, Paris)* (1934), p. 324 (cit. on p. 3).
- [2] E. Fermi. ‘Tentativo di una Teoria Dei Raggi  $\beta$ ’. In: *Nuovo Cim* 11.1 (1934) (cit. on p. 3).
- [3] C. L. Cowan et al. ‘Detection of the Free Neutrino: a Confirmation’. In: *Science* 124.3212 (1953), pp. 103–104 (cit. on p. 5).
- [4] IceCube Collaboration. ‘Neutrino emission from the direction of the blazar TXS 0506+056 prior to the IceCube-170922A alert’. In: *Science* 361 (2018), pp. 147–151 (cit. on p. 5).
- [5] IceCube Collaboration et al. ‘Multimessenger observations of a flaring blazar coincident with high-energy neutrino IceCube-170922A’. In: *Science* 361 (2018) (cit. on p. 5).
- [6] R. Davis Jr. et al. ‘A search for neutrinos from the Sun’. In: *Phys. Rev. Lett.* 20.1205 (1968) (cit. on p. 5).
- [7] R. Ahmad et al. ‘Measurement of the rate of  $\nu_e + d \rightarrow p + p + e^-$  interactions produced by 8B solar neutrinos at the Sudbury Neutrino Observatory’. In: *Phys. Rev. Lett.* 87 (2001), p. 071301 (cit. on p. 6).
- [8] R. Ahmad et al. ‘Direct evidence for neutrino flavor transformation from neutral current interactions in the Sudbury Neutrino Observatory’. In: *Phys. Rev. Lett.* 89 (2002), p. 011301 (cit. on p. 6).
- [9] K. Hirata et al. ‘Observation of a neutrino burst from the supernova SN 1987A’. In: *Phys. Rev. Lett.* 58.1490 (1987) (cit. on p. 6).

- [10] K. Hirata et al. 'Observation in the Kamiokande-II detector of the neutrino burst from supernova SN1987A'. In: *Phys. Rev. D* 38.448 (1988) (cit. on p. 6).
- [11] R. M. Bionta et al. 'Observation of a neutrino burst in coincidence with supernova 1987A in the Large Magellanic Cloud'. In: *Phys. Rev. Lett.* 58.1494 (1987) (cit. on p. 6).
- [12] C. B. Bratton et al. 'Angular distribution of events from SN 1987A'. In: *Phys. Rev. D* 37.3361 (1988) (cit. on p. 6).
- [13] E. N. Alekseev et al. 'Possible detection of a neutrino signal on 23 February 1987 at the Baksan underground scintillation telescope of the Institute of Nuclear Research'. In: *Pisma Zh. Eksp. Teor. Fiz.* 45.461 (1987) (cit. on p. 6).
- [14] E. N. Alekseev et al. 'Detection of the neutrino signal from SN 1987A in the LMC using the INR Baksan underground scintillation telescope'. In: *Phys. Lett. B* 205.209 (1988) (cit. on p. 6).
- [15] G. Bellini. 'The geo-neutrinos'. In: 24 (Apr. 2012), pp. 02001– (cit. on p. 6).
- [16] F. Reines et al. 'Evidence for High-Energy Cosmic-Ray Neutrino Interactions'. In: 15 (Aug. 1965), pp. 429–433 (cit. on p. 6).
- [17] A. Hess. 'Über die Bedeutung der durchdringenden Strahlung bei sieben Freiluftbal- lonfahrten'. In: *Phys. Zeitschr* 12.998 (1912), 1084–1091 (cit. on p. 6).
- [18] C. Patrignani et al. 'Review of Particle Physics'. In: *Chinese Physics C* 40.10 (2016) (cit. on p. 7).
- [19] E. Fermi. 'On the Origin of the Cosmic Radiation'. In: *Phys. Rev.* 75 (8 1949), pp. 1169–1174 (cit. on p. 8).
- [20] R. Engel T. K. Gaisser and E. Resconi. 'Cosmic Rays and Particle Physics'. In: *Cambridge University Press* (2016) (cit. on p. 8).
- [21] T. Wibig and A. W. Wolfendale. 'At what particle energy do extra-galactic cosmic rays start to predominate?' In: *J. Phys.* G31 (2005), 255–264 (cit. on p. 8).
- [22] K. Greisen. 'End to the cosmic ray spectrum?' In: *Phys. Rev. Lett* 16 (1996), pp. 748–750 (cit. on p. 8).



- [23] G. T. Zatsepin and V. A. Kuzmin. 'Upper limit of the spectrum of cosmic rays'. In: *JETP Lett.* 4 16 (1996), pp. 78–80 (cit. on p. 8).
- [24] P. Desiati. 'IceCube : Toward a km<sup>3</sup> Neutrino Telescope'. In: *proceeding del ECRS, Lisbon, Portugal* (2006), arXiv:astro-ph/0611603v1 (cit. on p. 10).
- [25] U. Katz et al. 'High-Energy Neutrino Astrophysics: Status and Perspectives'. In: *Prog.Part.Nucl.Phys.* 67 (2012), pp. 651–704 (cit. on p. 11).
- [26] B. Degrange and G. Fontaine. 'Introduction to high-energy gammaray astronomy'. In: *Comptes Rendus Physique* (2016), pp. 587–599 (cit. on p. 12).
- [27] S. Funk. 'Ground- and Space-Based Gamma-Ray Astronomy'. In: *Ann. Rev.Nucl. Part. Sci.* (2015), pp. 245–277 (cit. on p. 12).
- [28] M. Ackermann et al. 'Detection of the Characteristic Pion-Decay Signature in Supernova Remnants'. In: *Science* 339 (2013), p. 807 (cit. on p. 13).
- [29] A. De Angelis and M. J. M. Pimenta. 'Introduction to particle and astroparticle physics: questions to the Universe'. In: *Undergraduate lecture notes in physics, Milan: Springer* (2013) (cit. on p. 13).
- [30] G. Morlino, E. Amato, and P. Blasi. 'Gamma ray emission from SNR RX J1713.7-3946 and the origin of galactic cosmic rays'. In: *Mon. Not. Roy. Astron. Soc.* (2009), pp. 240–250 (cit. on p. 14).
- [31] A. Kappes et al. 'Potential Neutrino Signals from Galactic Gamma-Ray Sources'. In: *Astrophys. J.* (2007), pp. 870–896 (cit. on p. 14).
- [32] F. Vissani. 'Neutrinos from galactic sources of cosmic rays with known  $\gamma$ -ray spectra'. In: *Astropart. Phys.* (2006), pp. 310–313 (cit. on p. 14).
- [33] S. Gillessen et al. 'Monitoring stellar orbits around the Massive Black Hole in the Galactic Center'. In: *Astrophys. J.* (2009), pp. 1075–1109 (cit. on p. 14).
- [34] D. Horns and F. A. Aharonian. 'The Crab nebula. Linking MeV synchrotron and 50 TeV inverse Compton photons'. In: *ESA Spec.Publ.* (2004) (cit. on p. 14).

- [35] L. Tibaldo et al. ‘The Vela X pulsar wind nebula through the eyes of H.E.S.S. and Suzaku’. In: *PoS ICRC* (2017) (cit. on p. 14).
- [36] B. W. Carroll and D.A. Ostlie, eds. ‘An introduction to Modern Astrophysics’. In: *second Edition. Pearson* (2014) (cit. on p. 14).
- [37] V. Bosch-Ramon. ‘Multifrequency Behavior of Microquasars in the GeV–TeV era: A review’. In: *Mem. Soc. Ast. It.* 83 (2012) (cit. on p. 14).
- [38] A. Neronov and M. Ribordy. ‘Neutrino signal from gamma-ray loud binaries powered by high energy protons’. In: *Phys. Rev.* D79 (2009) (cit. on p. 15).
- [39] T. M. Yoast-Hull et al. ‘Gamma-ray puzzle in Cygnus X: Implications for highenergy neutrinos’. In: *Phys. Rev.* D96 (2019) (cit. on p. 15).
- [40] A. Albert et al. ‘Time-dependent search for neutrino emission from x-ray binaries with the ANTARES telescope’. In: *JCAP* 1704.04 (2017) (cit. on p. 15).
- [41] A. Albert et al. ‘TFirst all-flavor neutrino pointlike source search with the ANTARES neutrino telescope’. In: *Phys. Rev.* D96 (2017) (cit. on p. 15).
- [42] M. G. Aartsen et al. ‘Searches for Time Dependent Neutrino Sources with IceCube Data from 2008 to 2012’. In: *Astrophys. J.* 807.1 (2015) (cit. on p. 15).
- [43] M. G. Aartsen et al. ‘All-sky Search for Time-integrated Neutrino Emission from Astrophysical Sources with 7 yr of IceCube Data’. In: *Astrophys. J.* 835.2 (2017) (cit. on p. 15).
- [44] C. M. Urry and P. Padovani. ‘Unified schemes for radio-loud active galactic nuclei’. In: *Astron. Soc. Pac.* 107.803 (1995) (cit. on p. 15).
- [45] M. G. Aartsen et al. ‘Neutrino emission from the direction of the blazar TXS 0506+056 prior to the IceCube-170922A alert’. In: *Science* 361.6398 (2017), pp. 147–151 (cit. on p. 15).
- [46] M. G. Aartsen et al. ‘Multimessenger observations of a flaring blazar coincident with high-energy neutrino IceCube-170922A’. In: *Science* 6398 (2018) (cit. on p. 15).

- [47] F. Piron. ‘Gamma-Ray Bursts at high and very high energies’. In: *Comptes Rendus Physique* 17 (2016) (cit. on p. 15).
- [48] V. A. Acciari et al. ‘Teraelectronvolt emission from the  $\gamma$ -ray burst GRB 190114C’. In: *Nature* 575 7783 (2019), 455–458 (cit. on p. 16).
- [49] H.E.S.S. Collaboration. ‘GRB190829A: Detection of VHE gamma-ray emission with H.E.S.S.’ In: <http://www.astronomersteletgram.org/?read=13052>. () (cit. on p. 16).
- [50] E. Waxman and J. N. Bahcall. ‘A very-high-energy component deep in the -ray burst afterglow’. In: *Nature* 7783 (2019), 464–467 (cit. on p. 16).
- [51] T. K. Gaisser, R. Engel, and E. Resconi. ‘Cosmic Rays and Particle Physics.’ In: *Cambridge University Press* () (cit. on p. 16).
- [52] B. P. Abbott et al. ‘GW170817: Observation of Gravitational Waves from a Binary Neutron Star Inspiral’. In: *Phys. Rev. Lett.* 119.16 (2017), p. 161101 (cit. on p. 16).
- [53] E. Waxman and J. N. Bahcall. ‘High-energy neutrinos from cosmological gamma-ray burst fireballs’. In: *Phys. Rev. Lett.* 78 (1997), 2292–2295 (cit. on p. 16).
- [54] M. G. Aartsen et al. ‘Search for Prompt Neutrino Emission from Gamma-Ray Bursts with IceCube’. In: *Astrophys. J.* 805.1 (2015), p. L5 (cit. on p. 16).
- [55] A. Albert et al. ‘Search for High-energy Neutrinos from Binary Neutron Star Merger GW170817 with ANTARES, IceCube, and the Pierre Auger Observatory’. In: *Astrophys. J.* 805.2 (2017), p. L35 (cit. on p. 16).
- [56] S. M. Adrián et al. ‘Limits on Dark Matter Annihilation in the Sun using the ANTARES Neutrino Telescope’. In: *Physics Letters B* 759 (2016), 69–74 (cit. on p. 17).
- [57] A. Albert et al. ‘Results from the search for dark matter in the Milky Way with 9 years of data of the ANTARES neutrino telescope’. In: *Physics Letters B* 769 (2017), p. 249 (cit. on p. 17).

- [58] A. Albert et al. ‘Search for relativistic magnetic monopoles with five years of the ANTARES detector data’. In: *Journal of High Energy Physics* 7.54 (2017) (cit. on p. 19).
- [59] M.A. Markov. ‘On High Energy Neutrino Physics’. In: *Proceeding del ICHEP, Rochester, Inglaterra* (1960), pp. 578–581 (cit. on p. 19).
- [60] P. A. Cerenkov. ‘Visible radiation produced by electrons moving in a medium with velocities exceeding that of light’. In: *Phys. Rev.* 52 (1937), pp. 378–379 (cit. on p. 22).
- [61] M. Spurio. ‘VParticles and Astrophysics: A Multi-Messenger Approach’. In: *Springer* (2015) (cit. on p. 24).
- [62] J. Learned and C. Spiering. *DUMAND and the origins of large neutrino detectors*. CERN Courier. Aug. 2016 (cit. on p. 28).
- [63] A. Roberts et al. ‘Status and aims of the DUMAND neutrino project: the ocean as a neutrino detector’. In: *Proceedings, International Neutrino Conference* (1976) (cit. on p. 28).
- [64] C. Spiering. ‘Towards high-energy neutrino astronomy’. In: *The European Physical Journal H* 37 (2012), pp. 515–565 (cit. on pp. 29, 34, 35).
- [65] O. Allkofer et al. ‘The DUMAND Stage II Detector and Its Capabilities’. In: *Proceedings of the 21st International Cosmic Ray Conference* 4 (Jan. 1990), p. 357 (cit. on p. 29).
- [66] E. Hazen et al. ‘The DUMAND II digitizer’. In: *Proceeding del ICRC, Calgary, Canadá* (1993) (cit. on pp. 30, 31, 33).
- [67] Baikal-GVD collaboration. ‘Scientific-Technical Report’. In: (2012) (cit. on p. 34).
- [68] V. Balkanov et al. ‘In situ measurements of optical parameters in Lake Baikal with the help of a Neutrino telescope’. In: *Applied optics* 38 (Dec. 1999), pp. 6818–25 (cit. on p. 36).
- [69] C. Wiebusch. ‘The Detection of Faint Light in Deep Underwater Neutrino Telescope’. PhD thesis. Rheinisch Westfälische Technische Hochschule Aachen, Dec. 1995 (cit. on p. 37).

- [70] U. Berson and C. Wiebusch. *The European Optical Module for DUMAND II, a Technical Description*. DUMAND internal note. Sept. 1993 (cit. on pp. 38, 39, 41).
- [71] P.K.F. Grieder. ‘NESTOR Neutrino Telescope Status Report’. In: *Proceedings to the ICRC* (2001) (cit. on pp. 42, 45).
- [72] S. E. Tzamarias. ‘NESTOR First Results’. In: *Proceedings to the VLVnT* (2003) (cit. on p. 42).
- [73] P.K.F. Grieder. ‘NESTOR Neutrino Telescope Status Report’. In: *Nuclear Physics B - Proceedings Supplements* 97.1-3 (2001), pp. 105–108 (cit. on pp. 43, 44).
- [74] E. Migneco et al. ‘The NEMO project’. In: *proceedings of the 1<sup>st</sup> VLVnT workshop, Amsterdam* (2003) (cit. on p. 48).
- [75] E. Migneco et al. ‘The Data Acquisition and Transport Design for NEMO Phase 1’. In: *IEEE Transactions on Nuclear Science* 55.1 (2008), pp. 233–240 (cit. on p. 48).
- [76] S. Adrián-Martínez et al. ‘Long term monitoring of the optical background in the Capo Passero deep-sea site with the NEMO tower prototype’. In: *European Physical Journal C* 76.2 (2016), pp. 1–11 (cit. on p. 49).
- [77] F. Ameli et al. ‘The data acquisition and transport design for NEMO phase 1’. In: *IEEE Transactions on Nuclear Science* 55.1 (2008), pp. 233–240 (cit. on p. 49).
- [78] E. Andres et al. ‘The AMANDA neutrino telescope: principle of operation and first results’. In: *Astroparticle Physics* 13.1 (2000) (cit. on pp. 51, 52, 54).
- [79] R. Klein et al. ‘IceCube: A Cubic Kilometer Radiation Detector’. In: *IEEE Transactions on Nuclear Science* 56 (July 2009), pp. 1141–1147 (cit. on pp. 55, 56).
- [80] F. Halzen and R. K. Spencer. ‘Invited Review Article: IceCube: An instrument for neutrino astronomy’. In: *The Review of scientific instruments* 81 (Aug. 2010), p. 081101 (cit. on p. 55).

- [81] G. Aartsen et al. ‘Observation of High-Energy Astrophysical Neutrinos in Three Years of IceCube Data’. In: *Phys. Rev. Lett.* 113 (Sept. 2014), p. 101101 (cit. on p. 55).
- [82] M. Ageron et al. ‘ANTARES: The first undersea neutrino telescope’. In: *Nuclear Instruments and Methods in Physics Research Section A: Accelerators, Spectrometers, Detectors and Associated Equipment* 656.1 (2011), 11–38 (cit. on pp. 61, 66).
- [83] J.A. Aguilar et al. ‘AMADEUS: The Acoustic Neutrino Detection Test System of the ANTARES Deep-Sea Neutrino Telescope’. In: *Nuclear Instruments and Methods in Physics Research Section A: Accelerators, Spectrometers, Detectors and Associated Equipment* 626.627 (2011), 128–143 (cit. on p. 62).
- [84] J.A. Aguilar et al. ‘Performance of the front end electronics of the ANTARES neutrino telescope’. In: *Nuclear Instruments and Methods in Physics Research Section A: Accelerators, Spectrometers, Detectors and Associated Equipment* 622.1 (2010), 59–73 (cit. on pp. 65, 69, 71).
- [85] J.A. Aguilar et al. ‘The data acquisition system for the ANTARES neutrino telescope’. In: *Nuclear Instruments and Methods in Physics Research Section A: Accelerators, Spectrometers, Detectors and Associated Equipment* 570.1 (2007), 107–116 (cit. on p. 65).
- [86] A. Margiotta. ‘Status of the KM3NeT project’. In: *JINST* 9 (2014), p. C04020 (cit. on p. 76).

# Acrónimos

**3D** Tres Dimensiones - *Three Dimensions*. 79

**ADC** Convertidor de Analógico a Digital - *Analogue to Digital Converter*. 36, 44, 48, 51, 52, 56, 67, 69, 70

**AGN** Núcleos de Galaxias Activas - *Active Galactic Nuclei*. 9, 12, 13

**AMANDA** Antartic Muon And Neutrino Detector Array. 13, 49–52, 54

**ANTARES** Astronomy with a Neutrino Telescope in Abyss environment  
RESearch. vii, xi, xii, 22, 40, 59–64, 67, 69–71, 74, 211

**ARCA** Astroparticle Research with Cosmics in the Abyss. 72–74, 212

**ARM** Máquina RISC Avanzada - *Advanced RISC Machine*. 56

**ARS** Muestreador Analógico en Anillo - *Analogue Ring Sampler*. 65–70

**ASIC** Circuito Integrado de Aplicación Específica - *Application-Specific Integrated Circuit*. 28, 29, 31, 44, 66, 67

**ATWD** Digitalizador de Forma de Onda del Transitorio Analógico - *Analog Transient Waveform Digitizer*. 44, 55, 56

**AVD** Convertidor de Analógico a Voltaje - *Analogue to Voltage Converter*. 67, 69

**BB** *Building Block*. 73

**CAE** Ingeniería Asistida por Ordenador - *Computer-Aided Engineering*. 31

**CAMAC** Control y Medida Asistido por Ordenador - *Computer-Aided Measurement And Control*. 32, 52

- CANGAROO** Collaboration of Australia and Nippon for a GAMMA Ray Observatory in the Outback. 11
- CC** Interacciones de Corriente Cargada - *Charged Current Interactions*. 20, 21
- CMOS** Semiconductor Complementario de Óxido Metálico - *Complementary Metal-Oxide-Semiconductor*. 28
- CPT** Carga eléctrica, paridad y sentido del tiempo - *Charge, Parity and Time Reversal*. 18
- CPU** Unidad de Procesamiento Central - *Central Processing Unit*. 32, 56
- CTF** Marco de Terminación de Cable - *Cable Termination Frame*. 73
- CU** Unidad de Calibración - *Calibration Unit*. 73
- DAC** Convertidor de Digital a Analógico - *Digital to Analogue Converter*. 48, 67, 68, 70
- DAQ** Adquisición de Datos - *Data Acquisition*. 52, 63, 65, 67
- DC/DC** Corriente Continua a Corriente Continua - *Direct Current to Direct Current*. 75
- DCL** Lógica de Corriente Continua - *Direct Current Logic*. 65
- DOM** Modulo Óptico Digital - *Digital Optical Module*. 54–58, 74, 75, 78, 79, 211, 213
- DU** Unidad de Detección - *Detection Unit*. 71, 73–75, 77
- DUMAND** Deep Underwater Muon And Neutrino Detector. 26–29, 31–37
- DWDM** Multiplexado por División de Longitud de Onda Densa - *Dense Wavelength Division Multiplexing*. 64
- ECL** Lógica de Emisores Acoplados - *Emitter-Coupled Logic*. 28, 32–35, 51
- Ego-Virgo** Observatorio de ondas Gravitatorias Europeo - *European Gravitational Observatory*. 19
- EM** ElectroMágnetica - *ElectroMagnetic*. 21–23
- EMSO** *European Multidisciplinary Seafloor and water-column Observatory*. 72



**EOM** Módulo Óptico Europeo- *European Optical Module*. 33, 34, 36

**fADC** Convertidor Analógico a Digital rápido - *fast Analog to Digital Converter*. 55, 56

**FIFO** Primero en Entrar Primero en Salir - *First Input First Output*. 30

**FPGA** Matriz de Puertas Programables - *Field-Programmable Gate Array*. 28, 44, 45, 55, 56

**GaAs** Arseniuro de Galio - *Gallium Arsenide*. 28, 30

**GPS** Sistema de Posicionamiento Global - *Global Positioning System*. 51, 65

**GRB** Brotes de Rayos Gamma - *Gamma Ray Burst*. 13, 15, 19

**GUT** Teorías de Gran Unificación - *Grand Unified Theory*. 16

**GVD** Gigaton Volume Detector. 37–39

**HALT** Ensayos de Vida Altamente Acelerada - *Highly Accelerated Life Tests*. 58, 213

**HASS** Ensayos de Filtrado con Stress Acelerado - *Highly Accelerated Stress Screen*. 58, 213

**HESS** High Energy Stereoscopic System. 10–12, 15

**HV** Alto Voltaje - *High Voltage*. 44, 49, 51

**IC** Circuito Integrado - *Integrated Circuit*. 28, 29

**ICRC** Conferencia Internacional de Rayos Cósmicos - *International Cosmic Ray Conference*. 19

**IMB** Detector Irvine – Michigan – Brookhaven. 9

**JB** Caja de Conexiones - *Junction Box*. 42, 61, 73, 77

**JULIA** Joint Underwater Laboratory and Institute for Astroparticle physics. 32–35

**LCM** Módulo de Control Local - *Local Control Module*. 62, 64, 65

**LED** Diodo Emisor de Luz - *Light Emitting Diode*. 34, 36, 44, 53, 55, 65

**LIGO** Observatorio de ondas gravitatorias por interferometría láser - *Laser Interferometer Gravitational - Wave Observatory*. 19

**LOM** *Launcher vehicle of Optical Modules*. 75–77

**LSB** Bit Menos Significativo - *Less Significant Bit*. 70

**LSP** La partícula más ligera supersimétrica- *Lightest Supersymmetric Particle*. 17

**MACRO** Monopole, Astrophysics and Cosmic Ray Observatory. 17

**MLCM** Módulo de Control Local Maestro - *Master Local Control Module*. 63, 64

**MM** Monopolo Magnético - *Magnetic Monopole*. 7, 16

**MTBF** Tiempo Medio Entre Fallos - *Mean Time Between Failures*. 28

**NC** Interacciones de Corriente Neutra - *Neutral Current Interactions*. 20, 21

**NEMO** NEutrino Mediterranean Observatory. 40, 46, 47, 71, 72

**NESTOR** Neutrino Extended Submarine Telescope with Oceanographic Research. 40–43, 71

**NIM** Módulo de Instrumentación Nuclear - *Nuclear Instrumentation Module*. 32, 51

**NT200** Neutrino Telescope 200. 37–39

**OM** Módulo Óptico - *Optical Module*. 27, 31, 32, 37, 38, 46, 47, 49, 60–63, 65–67

**ORCA** Oscillation Research with Cosmics in the Abyss. 73, 74, 212

**PCB** Placa de Circuito Impreso - *Printed Circuit Board*. 31

**PE** FotoElectrón- *PhotoElectron*. 33–36

**PMT** Fotomultiplicador - *PhotoMultiplier Tube*. 20, 22, 24, 27–38, 41–44, 47–52, 55, 56, 61, 62, 65–68, 71, 78, 79, 213

**PSD** Discriminador de Forma de Pulso - *Pulse Shape Discriminator*. 67–69

**PWN** Plerión - *Pulsar Wind Nebulae*. 11

**RCU** Unidad de Control Remoto - *Remote Control Unit*. 35

**SC** Controlador de Línea - *String Controller*. 27, 31

**SCM** Módulo de Control de Línea - *String Control Module*. 63, 64

**SCSI** Pequeña Interfaz del Sistema de Cómputo - *Small Computer System Interface*. 52

**SJB** Caja de Conexión Secundaria - *Secondary Junction Box*. 73

**SN** SuperNova. 5, 7, 9–11, 15, 52

**SNO** Observatorio de Neutrinos de Sudbury - *Sudbury Neutrino Observatory*. 9

**SPE** Un Solo Foeoelectrón - *Single PhotoElectron*. 66, 67, 69, 70

**SUSY** Supersimetría - *Supersymmetry*. 17

**TDC** Convertidor de Tiempo a Digital - *Time to Digital Converter*. 51, 52

**TS** Marca de Tiempo - *Time Stamp*. 68–70

**TVC** Convertidor de Tiempo a Voltaje - *Time to Voltage Converter*. 67–70

**VERITAS** Very Energetic Radiation Imaging Telescope Array System. 15

**WF** Forma de Onda - *WaveForm*. 66, 67, 69, 70

**WIMP** Partículas Masivas que Interactúan Débilmente - *Weakly Interacting Massive Particles*. 7, 17

**YAG** Granate de Itrio y Aluminio - *Yttrium Aluminium Garnet*. 52



# Lista de Figuras

1.1	Carta de Pauli a los “ <i>radioactivos miembros</i> ” de la conferencia de Tübingen en la que se postula por primera vez la existencia del neutrino. . . . .	4
1.2	Espectro de energía de los rayos cósmicos. Figura obtenida de [18]. . . . .	7
1.3	La energía de los mensajeros cósmicos con respecto a la distancia máxima a la que son detectables. Los fotones están afectados por la absorción del fondo infrarrojo y del fondo de microondas cósmico: el área sombreada en azul representa, para una energía dada, el rango de distancias que un fotón no puede alcanzar. Los protones, además de la deflexión debida a los campos magnéticos, también son absorbidos por el fondo de microondas: el área sombreada en rojo indica la distancia que un protón no puede alcanzar. Figura obtenida de [24]. . . . .	10
1.4	Flujo de neutrinos esperado y observado en función de la energía. La astronomía de neutrinos de alta energía cubre el rango entre $10^2$ GeV y 10 PeV. Figura obtenida de [25]. . . . .	11
1.5	Flujo de neutrinos atmosféricos y de muones atmosféricos para dos profundidades diferentes y para dos límites de energía diferentes. Figura tomada de [61] . . . . .	24
2.1	Evolución de las diferentes propuestas para DUMAND a lo largo del tiempo. Figura tomada de [64]. . . . .	29

2.2	Fotografía de la instalación de la operación marina para la instalación de la primera línea de DUMAND. . . . .	30
2.3	Diagrama de bloques del ASIC que implementa la electrónica de <i>readout</i> de DUMAND. Diagrama tomado de [66]. . . . .	31
2.4	Diagrama de bloques de la tarjeta electrónica de digitalización. Diagrama tomado de [66]. . . . .	33
2.5	Esquema de la arquitectura de NT200. Figura tomada de [64]. . . . .	35
2.6	Localización del detector en el lago Baikal[68]. . . . .	36
2.7	Esquema del EOM cuyo desarrollo se inició dentro de la colaboración JULIA y se planificó para su utilización en DUMAND II [70]. . . . .	39
2.8	Diagrama de bloques del sistema de <i>readout</i> del EOM para DUMAND II [70]. . . . .	41
2.9	Plano de situación del emplazamiento de NESTOR, actualmente es uno de los propuestos para KM3NeT [71]. . .	42
2.10	Piso de NESTOR, nótese la forma en estrella o hexágono [73].	44
2.11	Arquitectura de la torre de NESTOR [71]. . . . .	45
2.12	Emplazamiento de NEMO, cercano a las costas de Sicilia [74]. . . . .	48
2.13	Torre de NEMO. . . . .	49
2.14	Estructura de AMANDA [78]. . . . .	51
2.15	Esquema de la electrónica de adquisición de AMANDA [78]. .	52
2.16	Posición de la instrumentación de calibración de AMANDA [78].	54
2.17	Esquema principal de configuración de IceCube. . . . .	55
2.18	Electrónica de <i>readout</i> del DOM de IceCube. . . . .	58
3.1	Localización e ilustración artística de ANTARES. . . . .	61
3.2	Vista esquemática del telescopio de neutrinos ANTARES. . . .	62
3.3	OM de ANTARES. Se puede observar el PMT (Fotomultiplicador - <i>PhotoMultiplier Tube</i> ) fijado a la esfera mediante un gel transparente así como el penetrador a través del cual el OM comunica con el exterior . . . . .	63

3.4	Imagen de uno de los pisos de ANTARES con tres OMs y un LCM. . . . .	64
3.5	Línea de ANTARES lista para ser instalada. . . . .	65
3.6	Esquema del DAQ de ANTARES. La adquisición se realiza en el LCM enviándose los datos ópticos adquiridos al Data Filter, donde una vez tratados se almacenan en disco. El sistema de reloj proporciona la señal de sincronización a la electrónica de adquisición. El sistema de control se encarga de dirigir la adquisición del detector, gestionando los demás sistemas que forman el DAQ de ANTARES [82]. . . . .	66
3.7	Acople de impedancias entre el OM y el ARS [84]. . . . .	69
3.8	Arquitectura del ARS. Se pueden observar los tres niveles de <i>trigger</i> con los que se trabaja en ANTARES así como el muestreador de 1 GHz o el discriminador de la forma del pulso [84]. . . . .	71
3.9	Procedimiento de medida del tiempo en el ARS. Una marca de tiempo y tiempo de TVC son generados cuando la señal cruza el límite L0. La marca de tiempo viene determinada por el número de ciclos de 50 ns desde el último reset. El TVC da una sincronización más fina dentro del ciclos. . . . .	72
3.10	Integración de la señal de carga con tres condensadores trabajando en diferentes fases. Cuando el L0 es superado, la rampa de voltaje se congela y memoriza. . . . .	73
3.11	Tarjeta electrónica de adquisición de ANTARES con los ARSs. . . . .	74
4.1	Plano de situación de los tres emplazamientos de KM3NeT. Figura procedente de [86]. . . . .	76
4.2	Unas de la líneas de detección, DU, de KM3NeT en el momento de su instalación. . . . .	78
4.3	Esquema de una línea de detección, DU, de KM3NeT. . . . .	82

- 4.4 DOM de KM3NeT. Se puede observar la distribución de PMTs en la esfera. En el fondo, difuminado, uno de los LOMs de KM3NeT, donde se colocan las líneas de detección, DUs, para su instalación. . . . 83



